

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
 0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
 100100011110011011110010100110111001100101000110101001100110010101100010100100101011110100110
 00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
 00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
 110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
 0000111010100111100010101100100011100110110100100110110110011001010100111001010011001001001100
 1100110001110010011000101001010011110101010100000101010100011010111001100100011100101001001010
 00101001110011010011110001010010101110101001000010110001100110010101100010101100110100101001



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



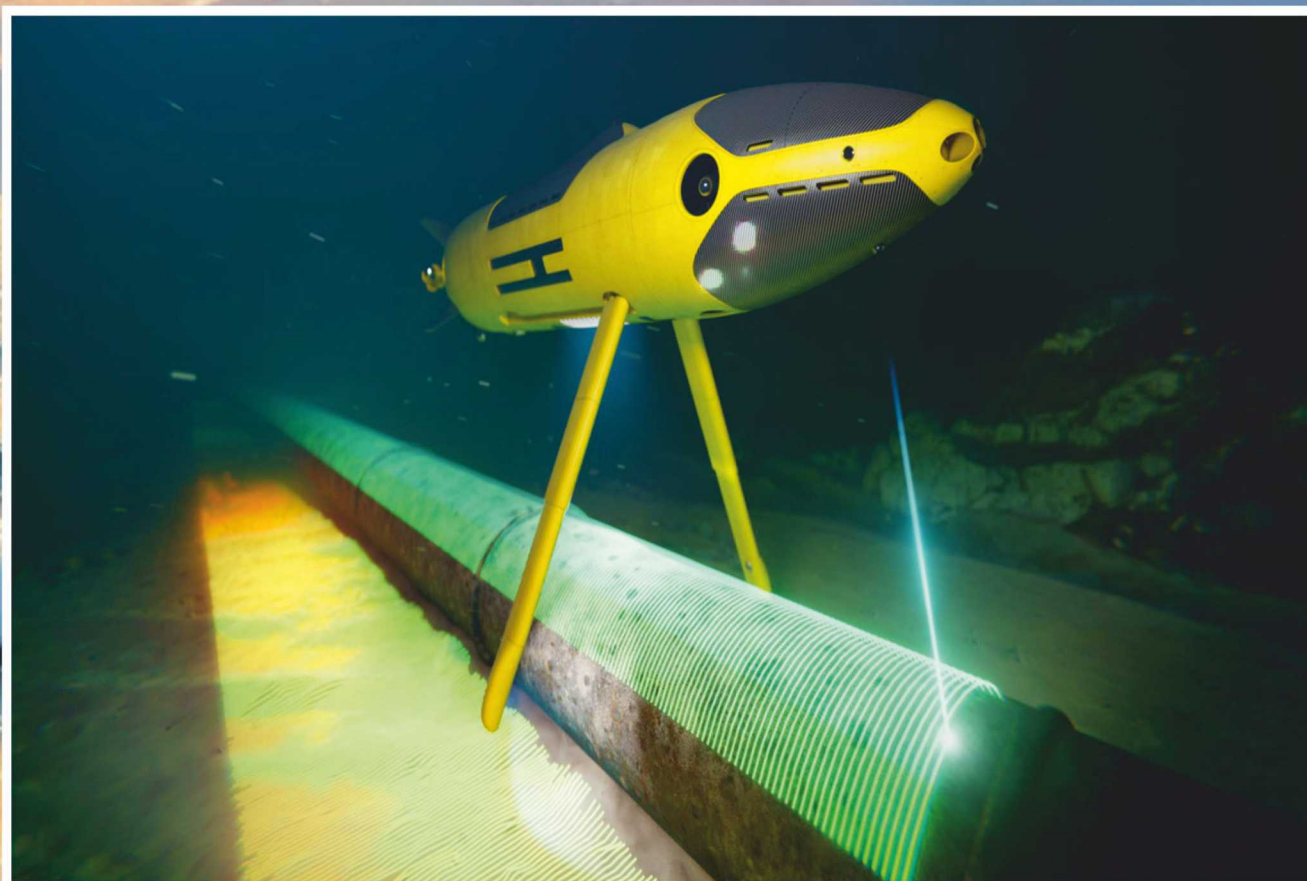
THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S
KNOWLEDGEbase

№ 2 Часть 1 2024
№ 2 Part 1 2024

Morskie intelektual 'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
 1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
 01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
 11010110000101011101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
 1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 101
 01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 часть 1 2024 Сквозной номер 64

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

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

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

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

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

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

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Стоимость номера журнала без доставки 3500 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2024



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 1 2024 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2024



ISSN 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

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

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

Члены Редколлегии

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

Редакционный Совет

Председатель

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

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит", Нижний Новгород
И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург
С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия
Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия
В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, научный руководитель предприятия, Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург
К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 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

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board chairmen

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

Council Members

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Марсович Искандеров**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской академии наук
- **Николай Николаевич Семенов**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Евгеньевич Ежов**, кандидат технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Виктор Иванович Филатов**, кандидат технических наук, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова,
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Виктор Михайлович Козин**, доктор технических наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Кирилл Дмитриевич Овчинников**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Михаил Вячеславович Хачумов**, кандидат физико-математических наук, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН
- **Владимир Владимирович Каретников**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Васильевич Гаврилов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Дмитрий Владимирович Никущенко**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Леонид Андреевич Краснодубец**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

- **Вадим Викторович Родионов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Си Проект
- **Юрий Александрович Кочнев**, кандидат технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И.Ульянова (Ленина)
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университета им. адм. Г.И. Невельского
- **Юрий Александрович Кочнев**, кандидат технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Николай Николаевич Гордеев**, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Nikolai N. Semenov**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **IUrii E. Ezhov**, Ph.D. (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Viktor I. Filatov**, Ph.D. (Eng.), Admiral Ushakov Maritime State University
- **Jurij P. Potechin**, Ph.D. (Eng), associate professor,, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Mikhail V. Khachumov**, Ph.D. (Phys & Math), Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences
- **Vladimir V. Karetnikov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir V. Gavrilov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Dmitry V. Nikushchenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, St. Petersburg state marine technical university
- **Aleksej YU. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical university
- **Leonid A. Krasnodubets**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Sevastopol State University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Vadim V. Rodionov**, Ph.D. (Eng), SeaProject
- **Yury A. Kochnev**, Ph.D. (Eng), Associate 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
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)

- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Michael V. Voyloshnikov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Yury A. Kochnev**, Ph.D. (Eng), Associate Professor Volga State University of Water Transport
- **Nikolai N. Gordeev**, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Денисов М.Е., Михеева А.А. О расчете турбулентных течений в трубопроводах с применением внутритрубных гладкостных покрытий.....	13
Рюмин С.Н., Барановский Б.О. Сравнительный анализ методов расчета нагрузки масс на начальных стадиях проектирования судна по разделу «Корпус металлический» на примере танкера ледового плавания.....	20
Роннов Е.П., Кочнев Ю.А. Оптимизация грузового судна с интервальной неопределённостью параметров технических решений и доминирующими факторами потенциала безопасности.....	33
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Карулин Е.Б., Карулина М.М., Жугина Е.В. Исследования эволюции ледового судоходного канала.....	38
Семенова В.Ю., Никитин Н. В., Динцер А.И. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях накрённых шпангоутных контуров.....	48
Альбаев Д.А. Определение амплитуд качки и ускорений на нерегулярном волнении с учетом нелинейных сил.....	57
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Данцевич И.М., Косолап Ю.Г., Черкасов А.В., Лютикова М.Н., Кравченко А.И. Исследование устойчивости систем морских выносных причальных устройств.....	63
Лебедева Е.Г. Определение основных элементов пульсатора двухфазного потока для осуществления промывки судовых систем.....	74
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Белый А.А. Оценка критериев параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей на основе правил классификационных обществ.....	82
Сергеев К.О. Результаты применения безразборной диагностики судовых вспомогательных механизмов.....	90
Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Модина М.А. Анализ вибрационных параметров винторулевых колонок фирмы Schottel марки SRP 300/226 морского буксира.....	97
Дологлонян А.В. , Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками.....	107
Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Оптимизация дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма.....	116
Епихин А.И., Хекерт Е.В. Интеллектуальная диагностика судового двигателя на базе нейронных сетей и модифицированного генетического алгоритма.....	122
Коньков А.Ю., Демаков К.К., Трунов А.И. Индицирование дизеля цифровой обработкой сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления.....	128
Равин А.А., Хруцкий О.В., Мицуков С.С. Имитационное моделирование экстремальных режимов судового пропульсивного комплекса с винтом регулируемого шага.....	136
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Дикарев А.В., Дмитриев С.М., Кубкин В.А., Василенко А.В, Абеленцев А.П. Определение точности измерения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов.....	145

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Автоматическое построение элементов представления процедурных знаний подводным интеллектуальным роботом в условиях недоопределенности.....	155
Гусак Е.В., Гурьев А.Т. Модель построения судовых кабельных сетей и метод их уточнения на этапе постройки.....	163
Бурьлин Я.В., Попов А.Н. Методика оценки информационной среды на основе модифицированного реально-виртуального континуума.....	173
Заслонов В.В., Головина А.А. Некоторые проблемные аспекты функционирования системы стандартизации в условиях развития морских технологических комплексов.....	181
Данцевич И.М., Лютикова М.Н. Системный анализ достижимости параметров динамики телеуправляемых аппаратов по показателям статической устойчивости и технической производительности.....	189
Лютикова М.Н. Анализ показателей эффективности подводных буксируемых комплексов по параметрам устойчивости и управляемости.....	198
Магомедов А.И. Интеллектуальная система управления траекторным движением морского подвижного объекта и классификации объектов.....	208
Малыгин И.Г., Цыганов В.В., Савушкин С.А. Технологии адаптации морских портов к изменению климата.....	219
Лукомская О.Ю., Бородина О.В., Шаталова Н.В. Проектирование морских интеллектуальных транспортных систем, опирающихся на показатели устройств обработки информации.....	232
Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования (ПТО) с использованием нечеткой логики.....	242
Куватов В. И., Заводсков Г.Н., Балобанов А.А., Колеров Д.А. Метод экспоненциального программирования в задачах управления организационными системами поиска и спасания на водном транспорте.....	252
Кузнецова Е.Ю., Даргис Е.А., Скороходов Д.А., Никитин Н.В., Системный анализ экологических факторов при проектировании прибрежных транспортных объектов в арктических морях.....	259
Артемьев А.В., Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Дудко Д.О., Сазонтова М.Д. Планирование маршрутов судов на основе многомерной кластеризации данных о движении.....	270

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Информационная поддержка обеспечения безопасности экологического взаимодействия судна и окружающей среды в процессе торможения с помощью гребного винта.....	279

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Февральских А.В., Орлов Ю.Ф., Панов А.Ю., Савинов В.Н., Титов В.Г. Формирование методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамических компоновок экранопланов на основе численного моделирования.....	286

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Коптев А.В. Глубоководные движения и зоны распределения давления.....	293
Чернова А.И., Старжинская Н.В. Многокритериальный выбор системы технической эксплуатации средств обмена данными морского автономного надводного судна.....	298
Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании развития и тушения пожара при паромной перевозке железнодорожных составов.....	305

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Mikhail E. Denisov, Anastasia A. Mikheeva About the calculation of turbulent flows in pipelines using in-line smooth-walled coatings.....	13
Sergey N. Ryumin, Boris O. Baranovskii Comparative analysis of methods for calculation of weights at the initial stages of vessel design in the group 'Steel Hull' using the example of ice-going tanker.....	20
Evgeny P. Ronnov, Yury A. Kochnev Directions of development of methods for optimization of design elements and characteristics of transport vessels.....	33
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Evgeny B. Karulin, Marina M. Karulina, Ekaterina V. Zhugina Study of navigable ice channel evolution.....	38
Viktoriya Yu. Semenova, Nikolai V. Nikitin, Aleksandr I. Dintser Calculation of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions.....	48
Danil A. Al'baev Determination of amplitudes of motions and accelerations of ship on an irregular wave taking into account nonlinear forces.....	57
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Igor M. Dantsevich, Yuri G. Kosolap, Alexander V. Cherkasov, Marina N. Lyutikova, Anna I. Kravchenko Study of the stability of the anchor system of offshore mooring devices.....	63
Elana G. Lebedeva Determination of the main elements of a two-phase flow pulsator for flushing ship systems.....	74
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisahenko, Alexander A. Belyi Assessment of criteria for vibration parameters of marine 4-stroke engines based on the rules of classification societies.....	82
Konstantin O. Sergeev Results of diagnostics-in-place application for ship auxiliary mechanisms.....	90
Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisahenko, Marina A. Modina Analysis of vibration parameters of Schottel screw steering columns of the SRP 300/226 marine.....	97
Andrey V. Dologlonyan, Valerii T. Matveenko, Alexander G. Klimenko Microgas turbine plants with increased thermodynamic characteristics.....	107
Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Khekert, Marina A. Modina Optimization of a diesel-electric marine propulsion and power generation system using a genetic algorithm.....	116
Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Khekert Intelligent diagnostics of a marine engine based on neural networks and a modified genetic algorithm	122
Aleksey Yu. Kon'kov, Konstantin K. Demakov, Anton I. Trunov Obtaining a diesel indicator diagram by in-cylinder pressure change rate digital signal processing.....	128
Alexander A. Ravin, Oleg V. Khrutsky, Sergej S. Mizukov Simulation modeling of extreme ship conditions propulsion complex with adjustable pitch propeller.....	136
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Alexander V. Dikarev, Stanislav M. Dmitriev, Vitaliy A. Kubkin, Andrey V. Vasilenko, Arthur P. Abelentsev Determining the accuracy of range measurements between underwater objects using underwater acoustic modems.....	145
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov Automatic construction of procedural knowledge representation elements by an underwater intelligent robot under conditions of uncertainty.....	155
Evgeny V. Gusak, Alexander T. Guryev Ship Cable Routing Model and Refinement Method at the Stage of Construction.....	163
Yaroslav V. Burylin, Anatoliy N. Popov Methodology for assessing the information environment based on a modified real-virtual continuum.....	173

Vladimir V. Zaslونov, Anastasiya A. Golovina Some problematic aspects of the functioning of the standardization system in the context of the development of marine technological complexes.....	181
Igor M. Dantsevich, Marina N. Lyutikova System analysis of the achievability of the parameters of the dynamics of remote-controlled vehicle in terms of static stability and technical performance.....	189
Marina N. Lyutikova Analysis of performance indicators underwater towed systems by parameters stability and controllability.....	198
Aligadzhi I. Magomedov Intelligent system for marine mobile object trajectory motion control and object classification.....	208
Igor G. Malygin, Vladimir V. Tsyganov, Sergey A. Savushkin Technologies for adaptation of seaports to climate change.....	219
Olga Yu. Lukomskaya, Olga V. Borodina, Natalya V. Shatalova Design of marine intelligent transport systems based on the performance of information processing devices.....	232
Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Assessment of the technical condition of the port lifting and transport equipment (LTE) using fuzzy logic.....	242
Valery I. Kuvatov, Gennady N. Zavodskov, Andrey A. Balobanov, Dmitriy A. Kolerov Exponential programming method in the tasks of managing organizational search and rescue systems on water transport.....	252
Elena Y. Kuznetsova, Evgeniy A. Dargis, Dmitriy A. Skorohodov, Nikolai V. Nikitin System analysis of environmental factors in the planning and design of coastal transportation infrastructure at Arctic seas.....	259
Andrey V. Artemyev, Victor M. Grinyak, Alexander S. Devyatisilyi, Dmitry O. Dudko, Maria D. Sazontova Ships route planning based on multidimensional clustering of traffic data.....	270

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov Information support for ensuring the safety of the ecological interaction of the vessel and the environment during braking using a propeller.....	279

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Andrew V. Feuralskikh, Yuri F. Orlov, Alexey Y. Panov, Vladimir N. Savinov, Vladimir G. Titov Formation of a methodology for computer-aided design of aerohydrodynamic layouts of ekranoplanes based on numerical modeling.....	286

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Alexander V. Koptev Deep-sea movement and pressure distribution zones.....	293
Anna I. Chernova, Natalya V. Starzhinskaya Multi-criteria selection of a maintenance system for data exchange means of Maritime Autonomous Surface Ship.....	298
Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov On modeling the development and extinguishing of fire during ferry transportation of railway trains.....	305

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 532.5.013.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.001>

О расчете турбулентных течений в трубопроводах с применением внутритрубных гладкостных покрытий

Денисов М.Е.¹ mrdenisov@vk.com, Михеева А.А.² mikheeva.aa@rs-class.org

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

²Российский морской регистр судоходства

Аннотация. Предложена модификация классической модели Кармана для турбулентного трения, которая отличается отказом от условия бесконечности производной скорости на стенке. Вместо этого, в рамках предлагаемого подхода, для полированных, химически травленных труб и применяемых внутритрубных гладкостных покрытий, представлено граничное условие на первую производную скорости на стенке, которое зависит от числа Рейнольдса в трех характерных зонах и относительной шероховатости. Также представлено решение задачи о турбулентном течении несжимаемой вязкой жидкости в гладких и шероховатых трубах. Проведен анализ различий между течениями в трубах с равномерно-зернистой и технической шероховатостями, на основе предложенной модификации модели турбулентного трения. С достаточной точностью аппроксимировали известные интегральные и локальные экспериментальные данные по течениям в трубах во всем диапазоне чисел Рейнольдса и параметров относительной шероховатости.

Ключевые слова: расчет, турбулентное течение, модель Кармана, опыты Никурадзе, техническая шероховатость, равномерно-зернистая шероховатость, математическая модель

Для цитирования: Денисов М.Е., Михеева А.А. О расчете турбулентных течений в трубопроводах с применением внутритрубных гладкостных покрытий, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 13—19. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.001

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.001>

About the calculation of turbulent flows in pipelines using in-line smooth-walled coatings

Mikhail E. Denisov ¹ mrdenisov@vk.com, Anastasia A. Mikheeva ² mikheeva.aa@rs-class.org

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²R&D Specialist FAI Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article proposes a modification of the classical Karman model for turbulent friction, is proposed, which differs in rejecting the condition of infinity of the velocity derivative on the wall. Instead, within the framework of the proposed approach, for polished, chemically etched pipes, and applied in-pipe smooth coatings, a boundary condition for the first derivative of velocity on the wall is presented, which depends on the Reynolds number in all three characteristic zones and relative roughness. The solution of the problem of turbulent flow of incompressible viscous fluid in smooth and rough pipes is also presented. The analysis of the differences between flows in pipes with uniformly granular and technical roughness is carried out, based on the proposed modification of the turbulent friction model. Known integral and local experimental data on flows in pipes over the entire range of Reynolds numbers and relative roughness parameters were approximated with sufficient accuracy.

Keywords: calculation, roughness, turbulent flow, Karman model, Nikuradze's experiments, technical roughness, uniformly granular roughness, mathematical model

For citation: Denisov M.E., Mikheeva A.A. About the calculation of turbulent flows in pipelines using in-line smooth-walled coatings, Marine intelligent technologies. 2024. № 2 part 1, P. 13—19. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.001

Введение

Трубы, с уменьшенным показателем шероховатости [1] можно охарактеризовать по методу обработки стенки: механическая обработка, химическое травление или использование специальных покрытий. Примеры некоторых из них:

1. Механическая обработка. - включает использование механических средств, в целях удаления отложений с внутренней поверхности труб.

Данный метод может быть неэффективным в случае, если материал трубы имеет повышенную твердость.

2. Химическая обработка - метод подразумевает травление труб кислотными растворами для удаления отложений и крупных шероховатостей на внутренней поверхности труб.

3. Использование специальных покрытий: Существуют специальные покрытия, которые можно нанести на внутреннюю поверхность трубы, чтобы улучшить ее гидравлическую гладкость. Данная

технология позволяет получить равномерно-зернистую шероховатость, аналогичную полученной в результате опытов Никурадзе.

Гидравлическая гладкость труб - это важный параметр, который влияет на эффективность транспортировки жидкостей и газов через трубопроводы. Более гладкие трубы имеют сниженное сопротивление потоку [2], что позволяет уменьшить затраты энергии, необходимые для транспортировки жидкости или газа. При этом стоит учесть, что гидравлическая гладкость может быть нарушена из-за накопления отложений на внутренней поверхности труб.

Шероховатость поверхности внутренней поверхности труб является важным параметром при проектировании и выборе трубопроводной системы. Она оказывает влияние на гидравлическое сопротивление, пропускную способность и эффективность транспортировки жидкости или газа. Поэтому уменьшение шероховатости и улучшение гладкости имеют большое значение для обеспечения безопасной и эффективной работы трубопроводов.

Для турбулентных течений в шероховатых трубах можно использовать расчетную модифицированную модель турбулентности Кармана [3,4], которая позволяет произвести точный расчет для поля скоростей и сопротивлений. В отличие модели Кармана, эта модель позволяет удовлетворить граничному условию прилипания на стенке. Она позволяет при надлежащем определении первой производной скорости на стенке трубы удовлетворить граничному условию прилипания без введения, как у Кармана, гипотезы о вязком подслое и тем самым получить однослойную модель течения. На основе такой модификации модели Кармана можно рассчитывать профили скоростей и вычислять сопротивление для различных значений чисел Рейнольдса и параметра шероховатости. При этом оказывается возможным описать поведение потока в трубах и в переходной зоне между режимом течения в гидравлически-гладкой трубе и областью квадратичного сопротивления. Следует заметить, что характер течения и сопротивления в этой переходной зоне существенно разнятся для случаев равномерно-зернистой и технической шероховатостей.

Предлагаемая модифицированная модель Кармана представляет интерес, для изучения мало обследованного влияния шероховатости на теплоотдачу при течи теплоносителей в трубах, что имеет большое практическое значение в задачах транспортировки газа.

Постановка задачи

Рассмотрим установившееся турбулентное течение несжимаемой вязкой жидкости в прямой круговой трубе радиусом R под действием постоянного градиента давления вдоль оси $dp/dz = \text{const} < 0$.

Для данного течения имеет место лишь одна продольная компонента осредненной скорости $u(r)$, зависящая от одной радиальной координаты r . Уравнение движения сплошной среды в напряжениях дает в этом случае линейный закон распределения касательных напряжений τ по сечению трубы:

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{dp}{dz} r. \quad (1)$$

С другой стороны, реологическое соотношение для турбулентного потока по Карману имеет вид:

$$\tau = \rho \chi^2 \left(\left| \frac{du}{dr} \right|^3 \left/ \left| \frac{d^2u}{dr^2} \right|^2 \right) \frac{du}{dr}, \quad (2)$$

где ρ - плотность, $\chi = 0.4$ - постоянная Кармана. Выражения (1) и (2) приводят к уравнению движения жидкости в трубе, которое удобно записать в безразмерном виде. Введем безразмерные координаты и скорость:

$$\eta = \frac{r}{R}, \quad V = \frac{u}{V_*}, \quad (3)$$

где V_* - динамическая скорость, определяемая касательным напряжением на стенке:

$$V_* = \sqrt{|\tau_w|/\rho}, \quad \tau_w = \frac{1}{2} \frac{dp}{dz} R \quad (4)$$

Уравнение движения в безразмерной форме имеет вид:

$$\chi^2 \frac{|V'|^3}{|V''|^2} V' = -\eta \quad (5)$$

Здесь штрихами, помечены производные по η . Обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка (5) необходимо решать, используя условие прилипания и полагая конечной первую производную скорости на стенке:

$$\eta = 0, \quad V = 0, \quad V' = -f, \quad (6)$$

где f - некоторая, пока неизвестная, безразмерная функция, с помощью которой необходимо наилучшим образом описать поле скоростей и закон сопротивления, опираясь на экспериментальные данные. Из соображений размерности следует, что f является функцией динамического числа Рейнольдса Re_* и параметра шероховатости m :

$$Re_* = \frac{V_* R}{\nu}, \quad m = \frac{R}{k} \quad (7)$$

Здесь ν - кинематическая вязкость, k - высота бугорков шероховатости (реальная для равномерно-зернистой шероховатости и эффективная, для технической). Это означает, что в общем случае $f = f(Re_*, m)$.

Интегрирование уравнения (5) приводит к выражению:

$$V' = -\frac{1}{2\chi} \frac{1}{c_1 - \sqrt{\eta}} \quad (8)$$

Повторное интегрирование дает следующее выражение для профиля скоростей:

$$V = \frac{1}{\chi} [c_1 \ln(c_1 - \sqrt{\eta}) - (c_1 - \sqrt{\eta})] + c_2 \quad (9)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 ищутся из граничных условий (6). Условие прилипания приводит к выражению:

$$c_2 = -\frac{1}{\chi} [c_1 \ln(c_1 - 1) - (c_1 - 1)] \quad (10)$$

а условие на производную скорости дает:

$$c_1 = 1 + \frac{1}{2\chi} \frac{1}{f} = 1 + \frac{1,25}{f} \quad (11)$$

$$V_{cp} = 2,5c_1^5 \ln \frac{c_1}{c_1 - 1} - 2,5c_1^4 - 1,25c_1^3 - \frac{5}{6}c_1^2 - 0,625c_1 - 0,5 \quad (13)$$

Коэффициент сопротивления определяется формулой

$$\lambda = \frac{8|\tau_w|}{\rho u_{cp}^2} = \frac{8}{V_{cp}^2} \quad (14)$$

и является функцией c_1 , а это означает, согласно соотношений (12) и (15), что он является функцией f и тем самым чисел Re_* и m . Соответствующее число Рейнольдса, вычисленное по средней скорости и диаметру трубы, будет определяться формулой:

$$Re = \frac{2Ru_{cp}}{\nu} = 2Re_* V_{cp} \quad (15)$$

Используя данные опытов можно найти выражения для функции f для случаев течений в гидравлически гладких трубах и трубах с технической шероховатостью.

Шероховатость, равномерно-зернистая и техническая

Как известно, шероховатость стенок трубы существенно влияет на гидродинамику потока. Различают равномерно-зернистую и техническую шероховатости. Равномерно-зернистая использовалась в классических опытах Никурадзе [7], когда стенки трубы покрывались тщательно калиброванными частицами песка, аналогичного результата мы достигаем, покрывая внутреннюю поверхность стенки специальной грунтовкой или порошковым покрытием. Тем самым создается эталонная, регулярная, структура на поверхности

Но функция f пока не определена, следовательно не определена и постоянная c_1 . Поэтому выражение для профиля скоростей удобно записать через величину c_1 следующим образом, учитывая, что первая константа турбулентности $\chi = 0,4$:

$$V = 2,5 \left[c_1 \ln \frac{c_1 - \sqrt{\eta}}{c_1 - 1} - (1 - \sqrt{\eta}) \right] \quad (12)$$

Средняя скорость, отнесенная к динамической, определяется [5,6] как:

$$V_{cp} = \frac{u_{cp}}{V_*} = 2 \cdot \int_0^1 V \eta d\eta$$

После подстановки в это соотношение формулы (12) можно получить выражение для средней скорости через c_1 :

трубы. Техническая, реальная, шероховатость является нерегулярной, зависящей от многих факторов, начиная от технологических при изготовлении трубы и заканчивая условиями эксплуатации [8]. Оба вида шероховатости характеризуют внутреннюю поверхность гидравлически модифицированных труб, и могут быть определены относительной шероховатостью m согласно формулы (7), $m = R/k$. Для равномерно-зернистой шероховатости величина k - реальный размер бугорков шероховатости, для технической шероховатости это условная, эффективная, величина, которая для трубы диаметром $D = 2R$ находится по калибровочным гидродинамическим опытам. Она связана с коэффициентом сопротивления λ зависимостью:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7D}{k} \quad (16)$$

которую в литературе [5] называют формулой Прандтля для шероховатых труб.

Для обоих видов шероховатости на кривой сопротивления $\lambda(Re, m)$ различают три характерных участка. При относительно малых числах Рейнольдса Re имеет место режим течения в гидравлически гладкой трубе. При больших числах Re наблюдается режим квадратичного сопротивления. В промежуточной между этими режимами области чисел Рейнольдса, в переходной зоне, происходит сопряжение режимов гидравлически гладкой трубы и квадратичного сопротивления. При этом характер переходной зоны, характер сопряжения, зависит от типа шероховатости. Для равномерно-зернистой переходный участок мал, коэффициент

сопротивления λ здесь меньше, нежели на участке квадратичного сопротивления. Для технической шероховатости имеет место обратная картина – протяженность переходного участка велика, а коэффициент сопротивления больше по сравнению с зоной квадратичного сопротивления. Таким образом, течения в трубах с равномерно-зернистой и технической шероховатостями различаются лишь переходными зонами.

В зоне гидравлически гладкой трубы сопротивление описывается эмпирической формулой Прандтля, а в области квадратичного сопротивления формулой (16), которую можно представить в несколько другом виде, учитывая соотношение (7):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(7,4m) \quad (17)$$

Путем объединения формул Прандтля для гладких и шероховатых труб, Коулбрук [9] получил интерполяционную формулу для описания сопротивления при турбулентном течении в трубах с технической шероховатостью:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{1}{7,4m} \right) \quad (18)$$

Эта формула описывает сопротивление для труб с технической шероховатостью для всех чисел Рейнольдса, которая охватывает все три характерные зоны, включая переходную. Последнее обстоятельство особенно ценно в связи с тем, что большинство технических трубопроводов «работают» в переходной зоне. Для равномерно-зернистой шероховатости переходная зона до сих пор не подвергалась теоретическому анализу.

Далее будет рассмотрена гидродинамика течения в шероховатых трубах на основе формулы (12) с соответствующими краевыми условиями. С увеличением числа Рейнольдса, т.е. с увеличением Re_* , при достижении некоторого критического числа Re_{*1} наступает переходная зона, где $f = f(\text{Re}_*, m)$, которая затем плавно переходит в область квадратичного сопротивления, где $f = f(m)$ уже не зависит от числа Рейнольдса ($\lambda = \text{const}$, $f = \text{const}$).

Обработка экспериментальных данных Никурадзе с опорой на формулу Прандтля (17) дает следующую аппроксимацию для зоны квадратичного сопротивления:

$$f = (94m)^{0,983} \quad (19)$$

В таблице 1 приведены расчетные значения f по формуле (19), а также соответствующие им расчетные значения коэффициента сопротивления на основе формул (12), (14), (15).

Таблица 1

m	$\lg f$	$\lg(100 \cdot \lambda)$
15	3,085484	0,7764286
30,6	3,395622	0,6539903
60	3,686040	0,5523592
126	4,004611	0,4526138
252	4,301683	0,3687177
507	4,599818	0,2918968
1000	4,891878	0,2227396
10000	5,859232	0,0228392
100000	6,844509	-0,1183968

Формула (19) справедлива как для зернистой, так и для технической шероховатостей. Разница между этими видами шероховатостей проявляется только в переходной зоне.

Равномерно-зернистая шероховатость

На участке гидравлически гладкой трубы, где $f = 23,05 \text{Re}_*$, влияние шероховатости не проявляется вплоть до критического значения Re_{*1} , после достижения которого начинается переходная зона и далее происходит выход на режим квадратичного сопротивления. На основе обработки данных Никурадзе можно получить следующую эмпирическую формулу для Re_{*1} :

$$\text{Re}_{*1} = 8m \quad (20)$$

На Рис.1 показаны результаты обработки данных опытов Никурадзе [7] и построен график функции $f = f(\text{Re}_*, m)$.

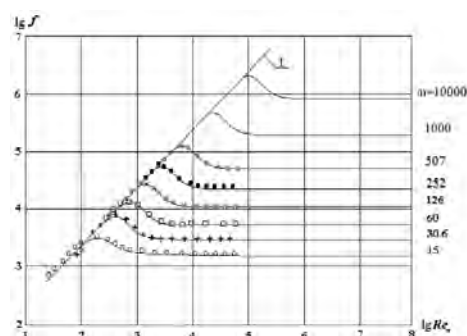


Рис. 1. Зависимость функции f от Re_* при разных m ; кривая 1 соответствует гидравлически гладкой трубе.

Эти результаты можно аппроксимировать следующим образом:

$$f = \begin{cases} 23,05 Re_* & , \quad Re_* \leq Re_{*1} = 8m \\ \left[23,05 Re_{*1} - (94m)^{0,983} \right] \psi_1 + (94m)^{0,983} & , \quad Re_* > Re_{*1} \end{cases} \quad (21)$$

где:

$$\psi_1 = \frac{71}{70 + (Re_*/Re_{*1})^5} \quad (22)$$

- функция, обеспечивающая переход от течения в гидравлически гладкой трубе к течению с квадратичным сопротивлением. Видно, что $\psi_1 = 1$

при $Re_+ = Re_{*1}$ и $\psi_1 \rightarrow 0$ при $Re_* \gg Re_{*1}$. На Рис.1 точками показаны данные опытов Никурадзе. Для сравнения там же нанесены расчетные кривые при $m = 1000$ и $m = 10000$ для случая течения в трубе с равномерно-зернистой шероховатостью.

После определения функции f можно, на основе формулы (21), выполнять расчеты течения. В таблице 2 приведены результаты таких расчетов для значения $m = 126$ при различных Re_* .

Таблица 2

$\lg Re_*$	$\lg f$	$\left(\frac{u}{V_*} \right)_{\max}$	$\left(\frac{u}{V_*} \right)_{cp}$	$\lg Re$	$\lg(100\lambda)$
1,778	3,144	15,040	11,880	3,154	0,753
2,0	3,310	16,011	12,838	3,410	0,686
2,778	3,772	18,658	15,465	4,268	0,524
3,477	3,946	19,661	16,463	4,995	0,470
4,0	3,985	19,890	16,691	5,524	0,458
6,0	4,004	19,994	16,794	7,526	0,453
8,0	4,004	19,996	16,797	9,526	0,453

Сопоставление с экспериментальными данными Никурадзе показывает хорошее согласование расчета и опыта, в том числе и для переходной зоны. На рис.2 показаны результаты расчета коэффициента сопротивления на основании предложенной модели (21) на фоне экспериментальных точек Никурадзе:

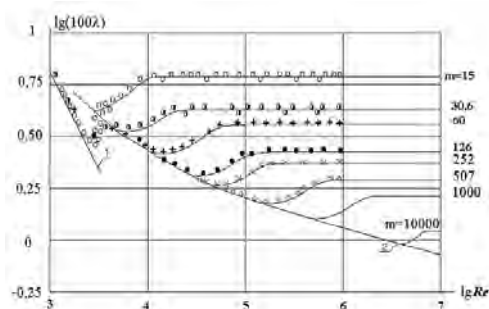


Рис. 2. Кривые сопротивления для течения в трубе с равномерно-зернистой шероховатостью; 1 - соответствует ламинарному режиму; 2 - гидравлически гладкой трубе.

Результаты расчета профилей скорости показывают, что в зоне квадратичного сопротивления они хорошо ложатся на одну кривую, соответствующую эмпирической формуле Шлихтинга [5], которую можно переписать в виде:

$$V = \frac{u}{V_*} = 5,75 \lg(m(1 - \eta)) + 8,5 \quad (23)$$

Техническая шероховатость

Для этого вида шероховатости экспериментальные данные полностью аппроксимируются формулой Коулбрука (21). На Рис.3 показаны результаты обработки формулы Коулбрука с целью построения графика функции $f(Re_*, m)$ для технической шероховатости.

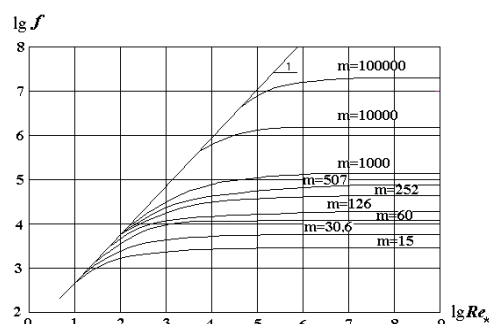


Рис. 3. Зависимость функции f от Re_* для разных m при технической шероховатости; кривая 1 - гидравлически гладкая труба.

Переход от режима течения, соответствующего гидравлически гладкой трубе, к режиму с проявлением шероховатости здесь наступает при критическом числе Re_{*1} , которое дается формулой [7]:

$$Re_{*1} = \frac{m}{2} \quad (24)$$

Кривые $f = f(Re_*, m)$ можно п аппроксимировать в виде:

$$f = \begin{cases} 23,05 Re_* & , Re_* \leq Re_{*1} = \frac{m}{2} \\ [23,05 Re_{*1} - (94m)^{0,983}] \psi_2 + (94m)^{0,983} & , Re_* > Re_{*1} \end{cases} \quad (25)$$

где переходная функция ψ_2 равна:

$$\psi_2 = \frac{18}{17 + (Re_*/Re_{*1})^{1,5}} \quad (26)$$

Из сравнения с формулой (21) видно, что для технической шероховатости существенно изменилась функция перехода, обеспечивающая выход от течения в трубе с гидравлически гладкими стенками к течению в режиме квадратичного сопротивления.

На основе формулы (25) можно рассчитывать профили скоростей и сопротивление. С увеличением числа Рейнольдса полнота профилей скорости увеличивается во всей переходной зоне вплоть до выхода на режим квадратичного сопротивления, после чего профиль скорости уже не меняется.

На Рис.4 приведен график сопротивления для труб с технической шероховатостью, построенный на основе формулы (25).

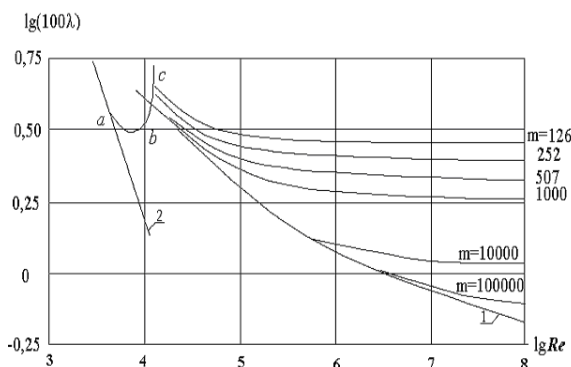


Рис. 4. Кривые сопротивления для течения с технической шероховатостью; кривая 1 соответствует гидравлически гладкой трубе; кривая 2 – ламинарному режиму; кривая abc – переходу от ламинарного режима к турбулентному.

Представляет интерес сравнение профилей скорости в переходной зоне при одних и тех же значениях Re_* и m для случаев равномерно-зернистой и технической шероховатостей. На Рис.5 показано такое сравнение по результатам расчетов на основе формул (33) и (34).

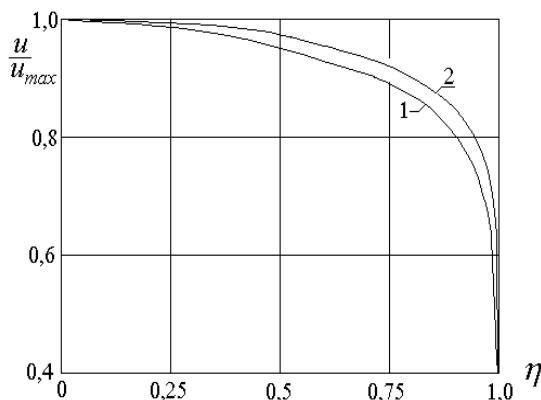


Рис. 5. Расчетные профили скоростей при $Re_* = 3500$, $m = 252$; кривая 1 - технической шероховатости, кривая 2 – равномерно-зернистой шероховатости.

Видно, что профили скоростей в переходной зоне для технической шероховатости менее полные, нежели для равномерно-зернистой.

Закключение

На основе вышеизложенного предлагается сравнительно простая в вычислительном плане модель течения жидкости в трубах с улучшенными гидравлическими характеристиками. Модель основана на формуле Кармана для турбулентного касательного напряжения, но в отличие от исходной, она использует модифицированное граничное условие производной скорости на стенке. С помощью этой модификации оказалось возможным описать весь диапазон течений в трубах от области течения в гидравлически гладкой трубе до режима квадратичного сопротивления, включая переходные зоны как для равномерно-зернистой, так и технической шероховатостей. Существенно, что в отличие от модели Кармана предложенная модель не требует введения вязкого подслоя.

Модель с достаточной точностью аппроксимирует известные интегральные и локальные экспериментальные данные по течениям в трубах во всем диапазоне чисел Рейнольдса и параметров относительной шероховатости. В переходной зоне модель отражает известную из опытов разницу в поведении течения при равномерно - зернистой и технической шероховатостями.

Литература

1. Сулейманов, В.А. Особенности газовой гидравлики в трубопроводах с внутренним гладкостным покрытием / В.А. Сулейманов // Газовая промышленность. - 2014. - № 11 (714). - С. 91-94. - ISSN 0016-5581

2. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. Госэнергоиздат. 1982.
3. Курбатова Г.И., Павловский В.А., Пастухова Е.В., Шестов К.В. О расчёте турбулентных течений в шероховатых трубах с равномерно-зернистой и технической шероховатостями// Физическая гидродинамика. Изд-во СПбГТУ, 2003, с.47-54.
4. Павловский В.А., Пастухова Е.В. Турбулентное установившееся неизотермическое течение жидкости с постоянными физическими свойствами в прямой круговой трубе// Труды СПбГМТУ: 2003, с.79-86.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. 1969. / Шлихтинг Г. – Москва: «Наука», 1974. – 774 с.
6. Павловский В.А., Чистов А.Л., Кучинский Д.М. Моделирование течений в трубах / Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика информатика. Процессы управления. 2019, Т. 15. Вып. 1. с.93-106.
7. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения жидкости в гладких трубах./ Проблемы турбулентности (под ред М.А. Великанова) М. ОНТИ. 1936. С.132-154
8. Шевелев Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного течения в трубах. М.: Стройиздат, 1953.
9. Colebrook C.F. Turbulent flow in pipes with particular reference in the transition region between the smooth and rough pipe laws// Journal Inst. Civil Engineers, 1938-1939. Febr., №4.

References

1. Suleymanov, V.A. Features of gas hydraulics in pipelines with an internal smooth coating / V.A. Suleymanov // Gas industry. - 2014. - № 11 (714). - Pp. 91-94.-. ISSN 0016-5581
2. Altshul A.D. Hydraulic resistances. Gosenergoizdat. 1982.
3. Kurbatova G.I., Pavlovsky V.A., Pastukhova E.V., Shestov K.V. On the calculation of turbulent flows in rough pipes with uniformly granular and technical roughness// Physical hydrodynamics. Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2003, pp.47-54.
4. Pavlovsky V.A., Pastukhova E.V. Turbulent steady-state non-isothermal flow of a liquid with constant physical properties in a straight circular pipe// Proceedings of St. Petersburg State Technical University: 2003, pp.79-86.
5. Schlichting G. Theory of the boundary layer. M. 1969. / Schlichting G. – Moscow: Nauka, 1974. – 774 p.
6. Pavlovsky V.A., Chistov A.L., Kuchinsky D.M. Modeling of flows in pipes / Bulletin of St. Petersburg University. Applied mathematics and computer science. Management processes. 2019, Vol. 15. Issue 1. P.
7. Nikuradze I. Regularities of turbulent fluid motion in smooth pipes./ Problems of turbulence (ed. by M.A. Velikanov) M. ONTI. 1936. pp.132-154
8. Shevelev F.A. Investigation of the basic hydraulic patterns of turbulent flow in pipes. M.: Stroyizdat, 1953.
9. Colebrook C.F. Turbulent flow in pipes with particular reference in the transition region between the smooth and rough pipe laws// Journal Inst. Civil Engineers, 1938-1939. Febr., №4.

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

Денисов Михаил Евгеньевич, аспирант, кафедра теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mrdenisov@vk.com

Mikhail E. Denisov, graduate student, Department of Thermophysical Fundamentals of Marine Energy, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya str., 3, e-mail: mrdenisov@vk.com

Михеева Анастасия Алексеевна, Специалист по научно-исследовательской работе, Российский морской регистр судоходства, 191186, Санкт-Петербург, ул. Дворцовая наб., 8, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

Anastasia A. Mikheeva, R&D Specialist FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186, St. Petersburg, Dvortsovaya Nab., 8, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2024

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.002>

Сравнительный анализ методов расчета нагрузки масс на начальных стадиях проектирования судна по разделу «Корпус металлический» на примере танкера ледового плавания

Рюмин С.Н.¹ rumin@smtu.ru, Барановский Б.О.¹ baranovski.boris@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. «Нагрузка масс» является одним из ключевых документов, входящих в состав проектной документации. Максимально точный расчет всех разделов нагрузки масс судна является важной составляющей проектного процесса, от ранних до заключительных этапов проектирования судна. Известно большое количество методов приближенного определения массы корпуса судна на начальных стадиях проектирования, однако результаты расчетов по этим методам часто дают большое расхождение с фактическими данными, получаемыми путем определения массы корпуса по документам рабочего проекта или по результатам кренования и взвешивания судна после спуска. В настоящей статье приведено описание наиболее распространенных приближенных методов определения массы металлического корпуса судна (как с применением, так без применения данных судна-прототипа), а также сравнение результатов расчета по этим методам с фактической массой корпуса нефтеналивного судна ледового плавания класса AFRAMAX, полученной путем прямого расчета. Для решения поставленной задачи использовалась трехмерная модель корпуса, выполненная в программе «Rhinoceros» и результаты процедуры «Набора по правилам», выполненной в программном комплексе «САПР-К» на основе требований Общих Правил МАКО для навалочных и нефтеналивных судов. Результаты работы могут быть полезными проектантам при выборе адекватного метода расчета массы металлического корпуса на начальных стадиях проектирования судна.

Ключевые слова: Нагрузка масс, масса металлического корпуса, масса судна порожнем, расчет водоизмещения судна.

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

Для цитирования: Рюмин С.Н., Барановский Б.О. Сравнительный анализ методов расчета нагрузки масс на начальных стадиях проектирования судна по разделу «Корпус металлический» на примере танкера ледового плавания. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 20—32. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.002

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.002>

Comparative analysis of methods for calculation of weights at the initial stages of vessel design in the group “Steel Hull” using the example of an ice-going tanker

Sergey N. Rumin¹ rumin@smtu.ru, Boris O. Baranovskii¹ baranovski.boris@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. “Calculation of Weights” is one of the key documents included in the design documentation. The most accurate calculation of all sections of the vessel's weights breakdown is an important component of the design process from the early to the final stages of vessel design. There are a large number of methods for approximate determination of the mass of a ship's hull at the initial stages of design, however, the results of calculations using these methods often give a large discrepancy with the actual data obtained by determining the mass of the hull from detailed design documents or from the results of inclining and weighing experiment for the vessel after launching. This article provides a description of the most common approximate methods for determining the mass of the steel hull (both with and without the use of data from a reference vessel), as well as a comparison of the calculation results using these methods with the actual mass of the hull of an AFRAMAX class ice-going oil tanker, obtained by direct calculation. To solve the problem, a 3-d model of the hull was used, made in the «Rhinoceros» program and the results of the prescriptive hull design procedure, carried out in the «CADS-HULL» software package based on the requirements of the IACS Common Rules for bulk carriers and oil tankers. The results of the work can be useful to designers when choosing an adequate method for calculating the mass of a steel hull at the initial stages of ship design.

Key words: Ship weight calculations, steel hull mass, light ship mass, calculation of ship displacement.

Financial Support: This research was carried out as a part of the strategic academic leadership program “Prioritet-2030”

For citation: Sergey N. Rumin, Boris O. Baranovskii, Comparative analysis of methods for calculating of weights at the initial stages of vessel design on the section “Steel hull” using the example of ice-going tanker, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 20—32. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.002

Введение

При разработке проекта судна особую сложность составляет расчет нагрузки масс по элементам, входящим в раздел «Корпус металлический».

Как показано в работе [1], в массе порожнего транспортного судна до 90% может составлять доля корпуса (см. рис. 1), что вызывает необходимость повышения точности определения массы всех его конструкций уже на начальных стадиях проектирования, когда еще отсутствует детальная проработка проекта.

Расчет нагрузки масс уже на ранних стадиях разработки проекта необходимо произвести с достаточной достоверностью, чтобы назначить лимиты нагрузки по всем разделам и передать эти значения отделам конструкторского бюро. В работе [2] утверждается, что хорошим результатом при расчетах нагрузки масс на начальных стадиях проектирования является достижение точности в 5%. Там же указано, что в первых приближениях погрешность расчетов может достигать значения до 10..12%, что требует проведения дополнительных приближений. Последствия, возникающие от наличия ошибки в расчетах массы корпуса на стадиях технического предложения и эскизного проекта, могут привести к необходимости значительных корректировок проектных документов судна на последующих стадиях его проектирования.

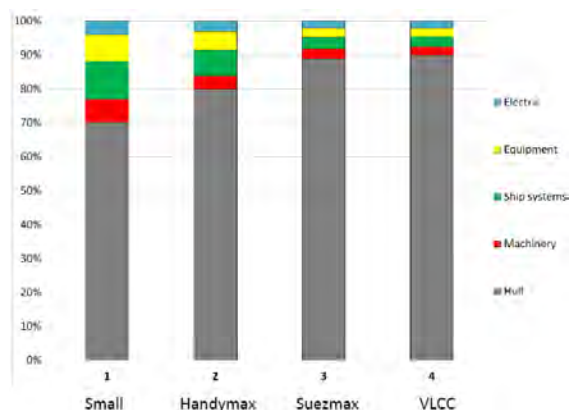


Рис. 1 – Доля составляющих массы порожнего судна на примере танкеров (проектные характеристики судов, дедвейт и водоизмещение порожнем приведены в работе [1]).

Разработки способов оценки водоизмещения судна и его отдельных составляющих по приближенным зависимостям выполнялись широким рядом авторов [3-23], и для расчета нагрузки масс на ранних стадиях проектирования ими предлагаются методы, основанные как на статистическом анализе данных построенных судов, так и на использовании судов-прототипов.

Принципиальные подходы к анализу нагрузки масс в отечественной практике были предложены еще в начале XX века в работах И. Г. Бубнова (1916 г.), А.П. Фан-Дер-Флита (1924), и других ученых, а в дальнейшем идеи этих авторов были развиты в учебниках и справочниках Л.М. Ногида (1964, [3,4]), В.В. Ашика (1984, [5]), А.В. Бронникова (1991, [6]), А.И. Гайковича (2015, [7]). В данных трудах приведены методы расчета нагрузки масс по всем её разделам, а также подробно описаны способы

расчета массы корпуса с использованием данных судна-прототипа. Системную базу для развития методов расчета нагрузки масс, в том числе при отсутствии близкого прототипа, заложили авторы Н.Carstens [8,9], K.Puchstein [10], H.Schneekluth [11], U. Hollenbach [12], S.A. Harvald и J.J. Jensen [13] (Германия), D.G.M. Watson [14] (Великобритания), A. Papanikolaou [15] (Греция). В 1973 году В.В. Степанов и Э.Н. Суженис (СССР) опубликовали результаты исследований по созданию метода расчета массы корпуса транспортных судов, обладающего высокой точностью, для чего была проведена процедура «Набора по Правилам» для корпусов систематического ряда судов. Расчеты были проведены согласно Правилам Регистра СССР 1970 года [16]. Вышеупомянутые методы имеют высокую ценность в условиях, когда конструкторское бюро не располагает обширной базой проектной информации по построенным ранее судам. Также существует достаточно много публикаций, предлагающих методы расчета нагрузки масс для судов отдельных типов. Так, для танкеров можно применить метод Ю.А. Кочнева и Е.П. Роннова [17], для газовозов – метод Дунь Синшо [18], для «малых» пассажирских судов – метод Е.В. Купальцевой [19] и другие. Для судов смешанного «Река-море» плавания большой объем исследования методов формирования нагрузки масс выполнен А.Г. Егоровым [20]. Для применения каждого из методов следует точно следовать ограничениям по типам судов, районам плавания и размерениям, указанным в упомянутых статьях.

В 2007 году был опубликован «Справочник по нагрузке масс морских судов» [21] (авторы: В.Н. Киреев, В.А.Мацкевич, Ю.И. Рязанцев), в котором приведены данные по проектам судов, разработанным в ЦКБ «Балтсудопроект» и описание методов расчета нагрузки масс. На сегодняшний день эти данные являются актуальными и часто применяются для составления нагрузки масс в отечественных конструкторских бюро.

Анализ вышеприведенных публикаций показывает, что авторы использовали различные подходы к формированию расчетных зависимостей, что является причиной появления расхождений в значениях массы корпуса, полученных в соответствии с предложенными методами. Кроме того, регулярное обновление требований Правил и Конвенций приводит к необходимости частой проверки и корректировки значений измерителей масс.

Для оценки адекватности предлагаемых методов была проведена серия расчетов массы корпуса по разным формулам и сравнение полученных значений с фактической массой корпуса «проверочного» судна (арктического танкера дедвейтом 120 000 т), которая была определена на основе процедуры «Набора по Правилам» и по 3D-моделям судовых конструкций. Были исследованы 11 методов, не связанных с пересчетом данных судна-прототипа, и один метод (согласно справочнику В.А. Мацкевича), основанный на данных судна-прототипа.

Далее в статье приведено краткое описание организации расчета нагрузки масс в конструкторском бюро (раздел 1), описание методов расчета массы корпуса, не требующих наличия

близкого прототипа (раздел 2), и сравнение этих методов между собой и с результатами прямого расчета массы корпуса судна (раздел 3).

1. Организация расчета нагрузки масс при разработке проекта. Основные принципы и правила формирования.

В условиях работы конструкторского бюро выделяют ряд терминов, главными из которых являются понятия *лимитов нагрузки* (это суммы масс и статических моментов по статьям, группам или разделам нагрузки, определенным на предыдущем этапе проектирования и являющимися предельными для следующего этапа проектирования), а также понятие *исполнительной нагрузки* (сводный расчет нагрузки масс порожнем, выпущенный по окончании разработки РКД.)

Расчет нагрузки выполняется в системе электронных таблиц или с применением специализированного программного обеспечения, к примеру, программы «ShipWeight» [22].

Нагрузка на всех стадиях разработки проекта составляется в соответствии с разбивкой масс по ОСТ 5Р.0206-2002 [23], при этом степень подробности рекомендуется принимать следующей:

- *техническое предложение* – по разделам (за исключением раздела «Корпус», который составляется по группам);
- *эскизный проект* – с той степенью подробности, которая может быть осуществлена на данной стадии проектирования, но как минимум, по группам;
- *технический проект и проектная документация судна в постройке (ПДСП)* – до статьи включительно.

По окончании каждого этапа проектирования судна, проектный отдел по полученным данным выполняет сводный расчет нагрузки масс, результаты которого, после согласования с главным конструктором, принимаются как утвержденный лимит для следующего этапа. При наличии возможности, значения масс и соответствующих им координат центров тяжести элементов нагрузки сверяются в отделах конструкторского бюро с ранее полученными данными прототипов или судов-аналогов. Значительные отклонения подлежат сверке и обоснованию, так как могут привести к серьезным ошибкам при дальнейшей разработке проекта. Строгое ведение элементов нагрузки масс необходимо и для исключения двойного учета масс по разным статьям и разделам.

В связи с отсутствием набора подробной проектной документации, нагрузка масс на стадиях технического предложения и эскизного проекта составляется на основе данных по судам-прототипам, статистических данных, расчетов по приближенным формулам и коэффициентам, а также другой информации, имеющейся в распоряжении отделов и главного конструктора.

На стадиях технического проекта и подготовки ПДСП составление нагрузки производится по номенклатуре конструкций и изделий, разрабатываемых КБ, по проектируемым изделиям контрагентских поставок, а для элементов, которые на этой стадии не могут быть учтены с достаточной

полнотой – на основании прототипов, статистических и других данных, полученных укрупненным расчетом.

Для формирования нагрузки при выпуске РКД используются рабочие чертежи и документация к ним по корпусу, судовым механизмам, устройствам, оборудованию помещений и изоляции, дельным вещам, по системам и трубопроводам, ведомости окраски, электрические схемы и т.д., Используются как чертежи, выполненные генеральным проектантом, так и полученные от контрагентов.

При разработке РКД отделы заполняют карты масс, в которых учитывается суммарная масса конструкции или оборудования и те статьи нагрузки, к которым данная конструкция или оборудование относятся. Карта масс согласовывается во всех ответственных за указанные статьи отделах для учета расходования соответствующих лимитов нагрузки.

По окончании стадии разработки РКД, проектный отдел составляет сводный расчет нагрузки масс, который является исполнительной нагрузкой по проекту судна.

2. Расчет нагрузки масс на начальных стадиях проектирования.

На начальных этапах проектирования судна возможны два подхода к формированию нагрузки масс судна: 1) использование данных судна-прототипа или группы прототипов; 2) применение методов, разработанных на основе статистических зависимостей и полученных путем обработки данных нагрузки масс различных судов.

Первый подход осложняется наличием конфиденциальности и отсутствием открытых данных по построенным судам. Подобную проблему испытывают проектанты, перед которыми стоит задача создать нетипичное судно с конструкторскими и технологическими особенностями.

Второй подход осложняется отсутствием централизации, так как конструкторские бюро и судостроительные верфи не разглашают в полной мере технические характеристики и чертежи проектов и, в том числе, постатейные таблицы нагрузки масс. Недостаточное взаимодействие конструкторских бюро и научно-исследовательских институтов приводит к значительному усложнению сбора статистических данных и, как следствие, получению результата с большой погрешностью.

В связи с вышеизложенными проблемами, необходима верификация известных методов расчета нагрузки, основанных на анализе статистических данных.

В большинстве методов использован так называемый «модуль», то есть произведения/соотношения/суммы главных характеристик судна с применением весовых коэффициентов. В части методов, требующих наличия судна-прототипа, такой коэффициент является непосредственно пересчитанным измерителем, а в методах второго типа его значение выводится на основе анализа статических данных.

В таблице 1 приведены наиболее распространенные методы, как требующие, так и не требующие наличия данных судна-прототипа.

Таблица 1

Методы расчета массы металлического корпуса судов

№ п/п	Год разработки метода	Метод, источник информации	Необходимость наличия данных судна-прототипа
1	1916	Метод И.Г. Бубнова [24], учитывает требования к прочности судна.	Да
2	1955	Статистическая формула Л.М. Ногида [4].	Да
3	1985	Метод Л.М. Ногида и В.В. Ашика, приведен в работах [5,6,21], представляет собой доработанный метод И.Г. Бубнова, постатейной оценки массы корпуса судна, учитывает требования к прочности.	Да
4	1959	Формула из справочника Д. Арнота [25].	Да
5	1966	Статистическая формула I. Johnsen и B. Ovrebo приведена в справочнике [7].	Нет
6	1967	Метод S. Sato, представлен в книге [11]	Нет
7	1972	Метод Det Norske Veritas, представлен в книге H. Schneekluth [11]	Нет
8	1973	Метод В.В. Степанова и Э.Н. Сужениса [16] представляет собой статистические формулы определения массы металлического корпуса, набранного согласно требованиям Правил Регистра СССР.	Нет
9	1976	Метод D.G.M. Watson [14], учитывает требования Правил Регистра Ллойда.	Нет
10	нет данных	Формула Б. Руиса (приведена в работах [6,21]).	Да
11	1985	Метод H. Schneekluth [11]	Нет
12	1992	Метод S.A. Harvald и J.J. Jensen [13]	Нет
13	нет данных	Формула Б.М. Конторовича, приведена в справочнике [21].	Нет
14	2007	Метод В.А. Мацкевича в справочнике [21] приведены формулы и данные судов-прототипов для расчета массы корпуса судна.	Да
15	нет данных	Формула А.Э. Цукшвердта, приведенная в справочнике [7], основана на геометрических характеристиках корпуса судна	Да
16	2009	Формула J. D'Almeida [22]	Нет
17	2010	Формула P. Cudina [23]	Нет

Перечисленные в табл. 1 методы и формулы не учитывают массу конструкций ледовых усилений. Для расчета их массы можно использовать современный способ, разработанный О.В. Таровиком и Е.М. Апполоновым в 2015 году, предложенный в [28].

2.1 Метод Det Norske Veritas (DNV)

Метод DNV, описанный в [11], представляет собой часть требований Правил этого Классификационного общества, разработанных в 1972 году.

Масса металлического корпуса определяется по следующей аппроксимирующей формуле:

$$W_{St} = \Delta \left(\alpha_L + \alpha_T \left(1.009 - 0.004 \frac{L}{B} \right) \cdot 0.06 \cdot \left(28.7 - \frac{L}{D} \right) \right)$$

где Δ – водоизмещение, т;

L – длина стального корпуса, м;

B – ширина судна, м;

D – высота борта, м.

Коэффициенты α_L , α_T для танкеров рассчитываются следующим образом:

$$\alpha_L = \frac{\left((0.054 + 0.004 \cdot \frac{L}{B}) \cdot 0.97 \right)}{\left(0.189 \cdot \left(100 \frac{L}{D} \right)^{0.78} \right)},$$

$$\alpha_T = 0.029 + 0.00235 \cdot \frac{\Delta}{10000},$$

для $\Delta < 600000$ т.

2.2 Метод S.A. Harvald u J.J. Jensen

В 1992 году S.A. Harvald и J.J. Jensen провели анализ нагрузки масс судов, построенных на датских верфях с 1960 г по 1992 г. и вывели формулу, представленную в [13], с дополнительными коэффициентами для каждого типа судна.

$$W_{St} = (L \cdot B \cdot D_A) \cdot C_S,$$

где L – длина стального корпуса, м;

B – ширина судна, м;

D_A – высота борта, увеличенная для учета объема надстройки, м;

Коэффициент C_S рассчитывается по формуле:

$$C_S = C_{S0} + 0.064e^{-(0.5u + 0.1u^{2.45})}$$

$$\text{где } u = \log_{10} \left(\frac{\Delta}{100} \right),$$

Δ – водоизмещение, т;

C_{S0} – коэффициент, учитывающий тип судна, для танкеров его можно принять равным 0,0752.

Метод предлагается в двух вариантах – в первом масса корпуса исследована в зависимости от дедвейта судна, во втором – от кубического модуля. В данном примере приведен второй вариант.

На рис. 2 показано графическое представление коэффициента C_{SO} для судов разных типов.

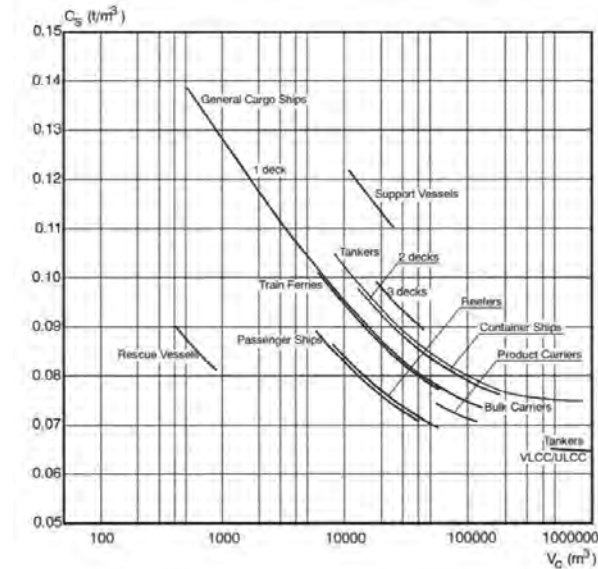


Рис. 2 Графическое представление коэффициента C_{SO} для судов разных типов для метода S.A. Harvald и J.J.Jensen [13]

2.3 Метод Н. Schneekluth

Метод, предложенный Н. Schneekluth был опубликован в 1972 году. Первоначально разрабатывался для сухогрузов, но позже был доработан и для других типов судов. Последняя версия метода показана в работе [11].

Масса металлического корпуса рассчитывается как произведение объема подпалубного пространства на значение условного удельного веса, с учетом поправочных коэффициентов:

$$W_{StR} = \nabla_U \cdot C_1 \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \left(\frac{L}{D} - 12\right)\right) \cdot \left(1 + 0.06 \cdot \left(n - \frac{D}{4m}\right)\right) \cdot \left(1 + 0.05 \cdot \left(1.85 - \frac{B}{D}\right)\right) \cdot \left(1 + 0.2 \cdot \left(\frac{T}{D} - 0.85\right)\right) \cdot \left(0.92 + (1 - C_{BD})^2 \cdot (1 + 0.75 \cdot C_{BD} \cdot (C_M - 0.98))\right),$$

где ∇_U – объем корпуса ниже верхней палубы, м³;
 C_1 – поправочный коэффициент;
 L – длина стального корпуса, м;
 D – высота борта, м;
 n – количество палуб;
 B – ширина судна, м;
 T – осадка судна, м;
 C_{BD} – коэффициент полноты проекции верхней палубы;

C_M – коэффициент полноты мидель-шпангоута;

Поправочный коэффициент для нефтеналивных судов принимается по формуле:

$$C_1 = 0.112 + L \cdot 10^{-4} \cdot (1.00 \pm 0.05)$$

2.4 Метод S.Sato

Метод S.Sato, приведенный в [11], разработан в 1967 году и представляет собой аппроксимирующую формулу, которая имеет вид:

$$W_{St} = \left(\frac{C_B}{0.8}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(5.11 \cdot L^{3.3} \cdot \frac{B}{D} + 2.56 \cdot L^2 \cdot (B + D)^2 \cdot 10^{-5}\right)$$

где C_B – коэффициент общей полноты;

L – длина стального корпуса, м;

B – ширина, м;

D – высота борта, м.

2.5 Метод D.G.M. Watson

В 1962 году автор метода D.G.M. Watson предложил использовать параметр «Характеристика снабжения» E_N (англ. – «Equipment Number») Правил Регистра Ллойда в качестве модуля для оценки массы металлического корпуса, вместо выражений вида $L \cdot B \cdot D$ или $L \cdot (B + D)$. Затем в 1998 году D.G.M. Watson усовершенствовал метод, представленный в [14], заменив «характеристику снабжения» на параметр формы корпуса E , который был назван «Hull Numeral» (англ.), а также добавив «весовой коэффициент», величина которого зависит от типа судна и значения параметра E .

Масса металлического корпуса для фактического значения коэффициента общей полноты рассчитывается по следующей формуле:

$$W_s = W_{st}(1 + 0.05(C_b - 0.70))$$

где W_{st} – масса металлического корпуса при коэффициенте полноты 0,7;

C_b – коэффициент общей полноты, при осадке по $0,8D$;

D – высота борта.

Значение массы металлического корпуса при коэффициенте общей полноты, равном 0,7, можно снять с рис. 3 или найти по следующей формуле:

$$W_{st} = K \cdot E^{1.36}$$

где K – коэффициент типа судна, принимается по таблице 2;

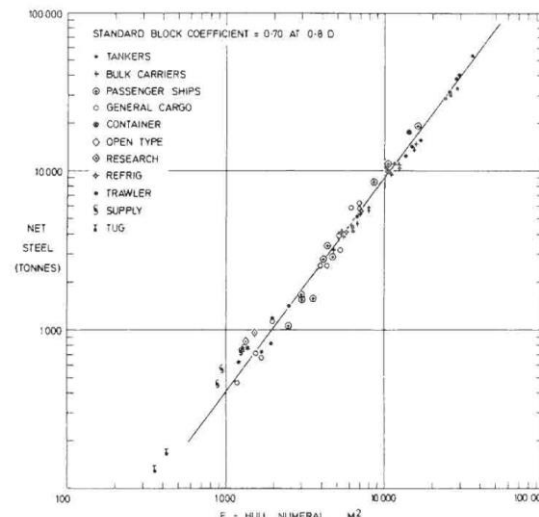


Рис. 3 Зависимость массы металлического корпуса судна от параметра E [14]

Значение параметра E определяется по следующей формуле:

$$E = L(B + T) + 0.85 \cdot L(D - T) + 0.85(l_1 \cdot h_1) + 0.75(l_2 \cdot h_2),$$

где

L – длина судна, м;

B – ширина судна, м;

T – осадка судна, м;
 D – высота борта, м;
 l_1 – длина надстройки, м;
 h_1 – высота надстройки, м;
 l_2 – длина ходовой рубки, м;
 h_2 – высота ходовой рубки, м.

Таблица 2

Значение «весового коэффициента» K в зависимости от типа судна и параметра E .

Тип судна	Коэф-т K	Диапазон значений E	Кол-во судов в анализе
Танкеры	$0,032 \pm 0,003$	1500 – 40000	15
Химовозы	$0,036 \pm 0,001$	1900 – 2500	2
Балкеры	$0,031 \pm 0,002$	3000 – 15000	13
Контейнеровозы	$0,036 \pm 0,003$	6000 – 13000	3
Рефрижераторные суда	$0,034 \pm 0,002$	4000 – 6000	6
Суда смешанного плавания	$0,030 \pm 0,002$	1000 – 2000	6
Суда снабжения	$0,045 \pm 0,005$	800 – 1300	5
Буксиры	$0,044 \pm 0,002$	350 – 450	2
Научно-исследовательские суда	$0,045 \pm 0,002$	1300 – 1500	2
Ро-Ро	$0,031 \pm 0,006$	2000 – 5000	7
Пассажирские суда	$0,038 \pm 0,001$	5000 – 15000	4

Для достижения более точного результата расчета, полученную массу корпуса судна рекомендуется увеличить на следующие коэффициенты:

$K_{сш} = 1,010$ – коэффициент учета сварных швов конструкции;

$K_6 = 1,015$ – коэффициент учета отклонения толщины стальных листов от назначенного конструктором значения (так называемый «недокат»).

2.6 Метод В.В Степанова Э.Н. Сужениса

В.В. Степанов и Э.Н. Суженис в работе [16] предложили способ определения массы металлического корпуса танкеров и сухогрузных судов, набранного по Правилам Регистра СССР 1970 года.

Расчет массы металлического корпуса для танкеров производится по следующей формуле:

$$G_{МК} = c \cdot G_{МКО} \cdot (1 + K_6 + K_{L/B} + K_{L/H} + K_\sigma),$$

где

$c = 1 + \left(\frac{1,35}{L^{1/2}}\right)$ – коэффициент, учитывающий массы частей металлического корпуса;

$G_{МКО}$ – масса металлического корпуса с усредненными значениями варьируемых параметров, т;

K_6 – коэффициент, учитывающий отклонение коэффициента полноты от типового значения;

$K_{L/B}$ и $K_{L/H}$ – коэффициенты, учитывающие отклонения соотношений главных размерений от принятых средних значений;

K_σ – коэффициент, учитывающий отклонение предела текучести материала корпуса;

L – длина судна между перпендикулярами, м.
Масса металлического корпуса с усредненными параметрами определяется по формулам:

- для судов длиной от 100 м до 180 м, при смешанной системе набора:

$$G_{МКО} = (3,68x^2 - 5,14x + 2,35) \cdot 10^3 \text{ т},$$

- для судов длиной от 180 м до 250 м, при продольной системе набора:

$$G_{МКО} = (8,56x^2 - 23,67x + 19,8) \cdot 10^3 \text{ т},$$

где $x = 0,01 \cdot L$.

Коэффициент K_6 рассчитывается по формуле:

$$K_6 = 3 \cdot (\delta/\delta_{CP})^2 - 5,15 \cdot (\delta/\delta_{CP}) + 2,15,$$

где

$$\delta_{CP} = 0,0006 \cdot L + 0,67;$$

δ – коэффициент общей полноты.

Значение $K_{L/B}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{L/B} = 0,667x^2 - 2,187x + 1,52;$$

где $x = \left(\frac{L}{B}\right)/6,5$.

Коэффициент $K_{L/H}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{L/H} = 2,333x^2 - 5,508x + 3,175;$$

где $x = \left(\frac{L}{H}\right)/12,5$.

Коэффициент K_σ рассчитывается по формуле:

$$K_\sigma = -(0,000181 + 0,2).$$

2.7 Метод I. Johnsen и B. Ovrebo

Норвежские исследователи I. Johnsen и B. Ovrebo разработали формулу для расчета массы металлического корпуса танкеров дедвейтом от 30000 до 200000 тонн, представленную в справочнике [7]:

$$G_{МК} = 4,04 \left(1 + \frac{0,73}{\sqrt{L}}\right) \cdot W^{0,65} \cdot L \cdot \left(1,104 - 0,016 \cdot \frac{L}{B}\right) \cdot \frac{22,8}{35,8 - \frac{L}{H}} \cdot \frac{35,9}{14 + \frac{L}{H}} \cdot (1,12 - 0,0163 \cdot \frac{L}{H}), \text{ т},$$

где

L – длина между перпендикулярами, м;

B – ширина, м;

H – высота борта, м;

W – момент сопротивления эквивалентного бруса, м³.

Минимальный момент сопротивления эквивалентного бруса согласно требованиям общества DNV, предлагается найти по формуле:

$$W_{min} = 2,173 \cdot L^{2,3} \cdot B \cdot (\delta + 0,7), \text{ м}^3,$$

где δ – коэффициент общей полноты.

При использовании сталей повышенной прочности рекомендуется использовать следующий коэффициент:

$$k_\sigma = 1 - \frac{L_\sigma}{L} \cdot \frac{1-R}{1,12-0,0163 \cdot L/H},$$

где

L_σ – длина корпуса в районе грузовых танков, м;

R – редуционный коэффициент (зависит от предела текучести материала).

2.8 Метод Л. М. Ногиды и В. В. Ашика

Метод оценки массы корпуса судна, разработанный Л. М. Ногидом и развитый В. В. Ашиком, представлен в учебнике [5] и учитывает требования к прочности судна.

Масса продольных связей судна, включая наружную обшивку, продольный и поперечный набор и другие элементы, определяется по следующей формуле:

$$P_{п.с.} = p_k \cdot c \cdot \Omega \cdot L,$$

где

p_k – плотность материала, кг/м³;

c – коэффициент;

Ω – площадь поперечного сечения эквивалентного бруса, м²;

L – длина между перпендикулярами, м.

Коэффициент, учитывающий уменьшение площади сечения эквивалентного бруса по длине судна, можно рассчитать по формуле, предложенной И.Г. Бубновым:

$$c = \delta^{1/3}$$

где δ – коэффициент общей полноты.

Масса поперечных переборок определяется по формуле:

$$P_{пер} = p_2 \cdot \delta \cdot n_{пер} \cdot B \cdot H^m,$$

где

$p_2 = (4,61 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$ – измеритель;

$n_{пер}$ – количество переборок;

B – ширина судна, м;

H – высота борта, м;

$m = 1.5..2.0$ – коэффициент.

2.9 Метод В.А. Мацкевича

Метод приведен в справочнике авторов В.Н. Киреева, В.А. Мацкевича, Ю.И. Рязанцева [21] и основан на применении данных судна-прототипа, в соответствии с измерителем массы корпуса. Необходимая база данных по судам-прототипам также приведена в справочнике.

Измеритель массы корпуса вычисляется по формуле:

$$K_{mk} = 0.157 - 1.14 \cdot (L_p \cdot B_p \cdot H_p)^{1/3} \cdot 10^{-3}$$

где L_p – длина между перпендикулярами судна-прототипа, м;

B_p – ширина судна-прототипа, м;

H_p – высота борта судна-прототипа, м.

2.10 Метод d'Almeida

Описание метода приведено в учебнике [21], формула включает в себя модуль на основе главных размерений, возведенных в разные степени, значение которых зависит от типа судна:

$$W_h = k_1 \cdot L^{k_2} \cdot B^{k_3} \cdot D^{k_4},$$

где значения коэффициентов (степеней) для нефтеналивных судов принимаются следующими:

$$k_1 = 0.0361;$$

$$k_2 = 1.60;$$

$$k_3 = 1.00;$$

$$k_4 = 0.22.$$

2.11 Метод Р. Судина

В работе [23] приведена следующая формула для расчета массы корпуса судна:

$$W_H = \left(1 - \frac{f_1}{100}\right) \left\{ 0.0282 [L_{pp} \times (B + 0.85D + 0.15T)]^{1.36} \left\{ 1 + 0.5 \left[(C_B - 0.7) + (1 - C_B) \frac{0.8D - T}{3} \right] \right\} + 450 \right\},$$

где f_1 – коэффициент, учитывающий снижение массы корпуса вследствие применения сталей повышенной прочности.

3. Сравнительный анализ рассматриваемых методов расчета массы корпуса

3.1 Прямой расчет массы корпуса судна

Для проведения процедуры сравнения значений массы корпуса, полученных разными методами, была выполнена проработка проекта танкера типа «AFRAMAX» в части набора корпуса по Правилам и моделирования конструкций, входящих в раздел «Корпус металлический», на основе чего был проведен прямой подсчет масс элементов, входящих в этот раздел.

В качестве базового был выбран корпус арктического танкера дедвейтом 120 000 т., проектные характеристики которого приведены в табл. 3. Для проектирования корпуса были использованы программы «Siemens-NX» [29] (Моделирование формы корпуса), «САПР-К» («Набор по Правилам»), разработанная в СПбГМТУ в рамках программы академического лидерства «Приоритет-2030» [30], «Rhinoceros» (3D-моделирование конструкций) [31].

Таблица 3.

Проектные характеристики базового судна

Длина между перпендикулярами, м	289,0
Ширина, м	49,0
Осадка, м	14,5
Высота борта, м	22,5
Дедвейт судна (заданный), т	120000,0
Водоизмещение судна, т	160000,0
Категория ледовых усилений	Arc7

В программе «Siemens-NX» были построены опорные линии (шпангоуты, ватерлинии и т.д.), заданы характерные и топологические участки и сгенерирована судовая поверхность (см. рис. 4).

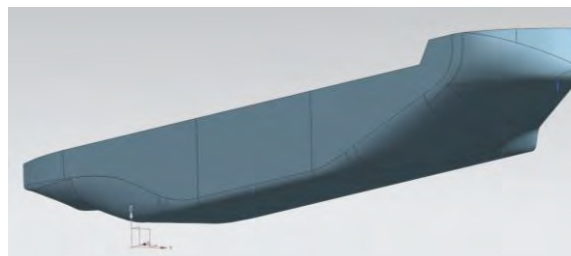


Рис. 4 Модель поверхности корпуса судна в программе «Siemens-NX»

Далее, из программы «Siemens-NX» в программный комплекс «САПР-К» посредством текстового файла формата «S2G» была передана каркасная модель корпуса судна (см. рис. 5), после чего было проведено конструктивное моделирование

всех перекрытий корпуса судна – наружной обшивки, палуб, переборок, второго дна и второго борта, платформ, диафрагм и т.д. Моделирование средней части судна проводилось в редакторе поперечного сечения «SecEditor» (см. рис. 6), перекрытий в оконечностях – «ShellEditor» (рис. 7,8). Оба редактора входят в программный комплекс «САПР-К».

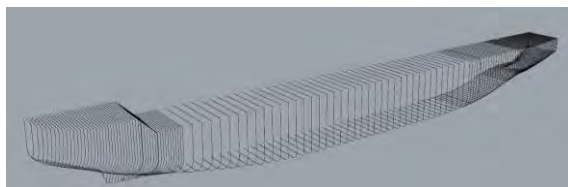


Рис. 5 Каркасная модель судовой поверхности.

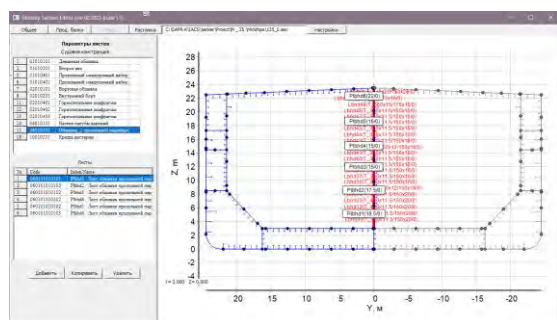


Рис. 6 Конструктивное моделирование средней части танкера

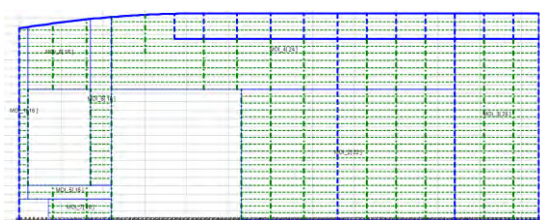


Рис. 7 Конструктивная схема перекрытия верхней палубы в кормовой части.

После разработки всех конструктивных схем в программе «САПР-К» была проведена процедура «Набора по Правилам» с применением «Prescriptive» требований Общих Правил МАКО для навалочных и нефтеналивных судов [32] – расчеты общей продольной прочности, предельной прочности, устойчивости, местной прочности, усталостной долговечности. Также в программе «САПР-К» были рассчитаны элементы, входящие в состав ледовых усилений судна для категории ледовых усилений «Arc7» в соответствии с требованиями Правил Российского Морского Регистра Судоходства [33]. Возможности программы «САПР-К» позволяют провести расчет массы всех элементов корпуса судна, по которым был выполнен «Набор по Правилам».

В программе «Rhinceros» было проведено моделирование элементов, не входящих в модель корпуса в комплексе «САПР-К»: платформ, диафрагм, выгородок, цистерн и фундаментов (их листовых и балочных элементов) в машинном отделении, поперечных танкерных рам, а также книц, бракет и других элементов конструкции (см. рис. 9 и 10).

Масса сварных швов была принята по рекомендации справочника [21] – 1,5% от массы металлического корпуса.

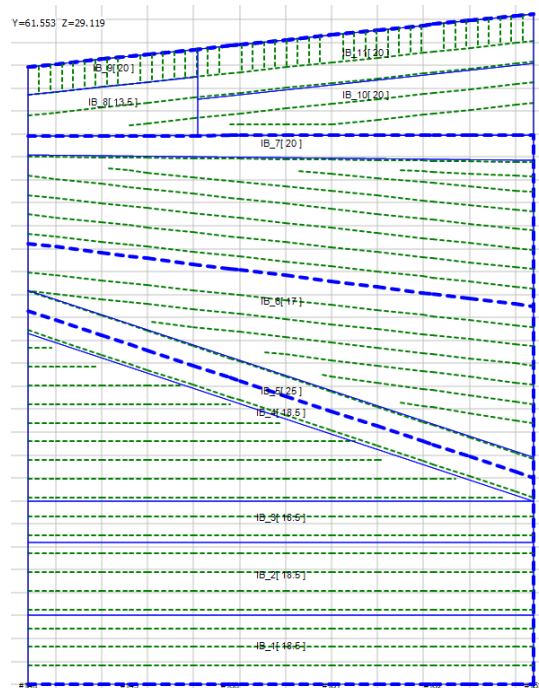


Рис. 8 Конструктивная схема перекрытия второго дна в районе кормовых грузовых танков.

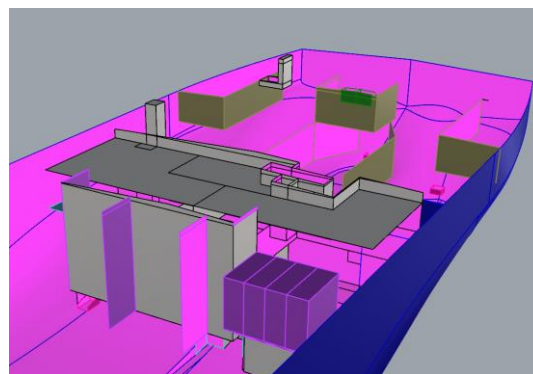


Рис. 9 Моделирование платформ и выгородок в машинном отделении.

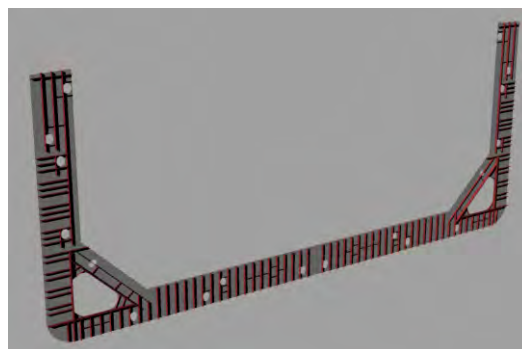


Рис. 10 Моделирование флоров, скуловых бракет и вертикальных диафрагм двойного борта.

Добавка к массе корпуса на ледовые усиления при проведении прямого расчета отдельно не рассчитывалась, т.к. была учтена «автоматически» при выборе толщин и сечений элементов.

Результаты «прямого» расчета массы металлического корпуса для базового судна приведены в табл. 4.

3.2 Сравнение результатов расчетов по рассмотренным методам

Как итог проведенных исследований, в табл. 5 приводится сравнение значений, полученных по формулам для массы корпуса, с учетом надбавки на ледовые усиления и отклонения (в процентах) полученных величин от результата расчета массы

корпуса прямым методом (на рис. 11 приведено графическое представление данных табл. 5). В связи с тем, что масса корпуса базового судна (29348 т.) включает и массу ледовых усилений, а верифицируемые методы предназначены для судов без усиления, к результатам всех расчетов была добавлена их масса, рассчитанная по методу О.М. Таровика и Е.М. Апполонова, и которая составила 5101 т. Метод расчета описан в работе [28].

Таблица 4

Масса укрупненных групп элементов конструкции корпуса судна.

Наименование укрупненной группы конструкций	Масса, т	Доля от общей массы раздела «Корпус металлический»
Наружная обшивка	9271	31.59
Верхняя палуба	4120	14.04
Второе дно	2893	9.86
Продольный междудонный набор	290	0.99
Платформы	3235	11.02
Внутренний борт	1256	4.28
Продольный междубортный набор	302	1.03
Продольная переборка	1272	4.34
Поперечные переборки	2637	8.98
Флоры и вертикальные диафрагмы	1991	6.79
Выгородки в МО	914	3.11
Кницы и бракетки	731	2.49
Сварные швы	435	1.48
Сумма	29348	100.00

Таблица 5

Результаты расчета массы металлического корпуса, полученной различными методами.

Методы расчета массы металлического корпуса	Масса по результатам расчетов по методу, т	Масса с учетом ледовых усилений, т	Отклонение значений от результата прямого расчета, %
Метод прямого расчета	29348	29348	0%
Формула Р.Судина	38046	43147	+47%
Формула d'Almeida	28814	33915	+16%
Метод В.А. Мацкевича	26957	32058	+9%
Метод В.В. Ашика - Л.М. Ногида	17608	22709	-23%
Формула I. Johnsen и B. Ovrebo	18451	23552	-20%
Формула В.В. Степанова и Э.Н. Сужениса	23213	28314	-4%
Метод D.G.M. Watson	20563	25664	-13%
Формула S.Sato	26937	32038	+9%
Метод H. Schneekluth	25643	30744	5%
Метод S.A. Harvald и J.J. Jensen	19073	24174	-18%
Формула Det Norske Veritas	5150	10251	-65%

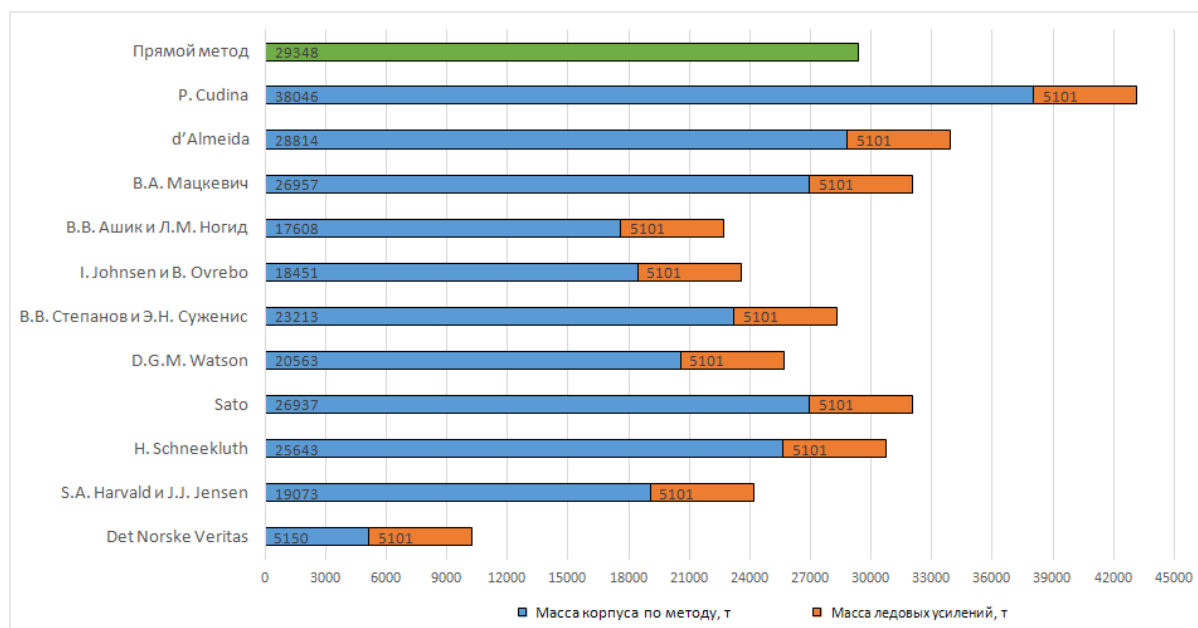


Рис. 11. Сравнение результатов расчета массы металлического корпуса, полученной различными методами.

Заключение

Постоянное совершенствование требований нормативных документов приводит к необходимости регулярной проверки существующих методик расчета массы корпуса судна. Развитие современных программных комплексов автоматизации разработки проектов, в т.ч. «Набора по Правилам», а также автоматизации создания цифровых моделей корпуса судна позволяет уточнить коэффициенты (измерители) в известных формулах для расчета массы корпуса без необходимости проведения трудоемкой процедуры рабочего проектирования судна.

Результаты расчетов массы корпуса по разным методам показали большой разброс значений, что указывает на необходимость обстоятельной их ревизии, а традиционно используемыми сегодня по-прежнему остаются методы, в которых предусмотрено использование данных «близкого» прототипа, что подтверждается приемлемым результатом расчета массы корпуса по методу В.А. Мацкевича (погрешность ок. 9%).

Метод, основанный на формуле для массы корпуса из требований Правил Det Norske Veritas 1970 г. показал результат с самым большим отклонением – 65 % в меньшую сторону, что, возможно, связано с недостатком информации об ограничениях его применимости и номенклатуре рассчитываемых элементов у авторов настоящей статьи. Подробной информации о методе, кроме работы [11], в открытых источниках не найдено.

Наиболее близкие результаты к рассчитанной прямым способом величине массы корпуса были получены по методам В.В. Степанова/Э.Н. Сужениса и H. Schneekluth (отклонение составило ок. 4% и 5% соответственно), что позволяет рекомендовать применение этих методов для судов, подобных рассматриваемому здесь тестовому судну типа «AFRAMAX». Следует отметить, что корпус судна в рамках данного исследования был спроектирован только по «Prescriptive» части Правил МАКО, и можно предположить, что после проведения МКЭ-анализа конструкций масса корпуса может измениться. Обоснование величины этой коррекции – предмет дальнейшего изучения авторами статьи.

Литература

1. Демешко Г.Ф., Рюмин С.Н. Нормативно-правовые и проектные аспекты создания современных танкеров. Ч. 2. Морской вестник. 2015. № 4 (56). с. 18-21.
2. Киреев В.Н., Мацкевич В.А., Рязанцев Ю.И.. Расчет нагрузки масс и водоизмещений судна по измерителям. Морской вестник, №4(20), 2006, с. 91-98.
3. Ногид Л.М. Проектирование морских судов. Часть первая. Методика определения элементов проектируемого судна, Л., Судостроение, 1964. – 361 с.
4. Ногид Л.М. Теория проектирования судов. Л., Судпромгиз, 1955 – 480 с.
5. Ашик В.В. Проектирование судов. Учебник – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.:Судостроение, 1985. – 320 с.
6. Бронников А.В. Проектирование судов / Учебник – Л.: Судостроение, 1991. – 320 с., ил.
7. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / Монография в 2 т. Т. 1 8. Описание системы «Корабль». – СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – 819 с..
8. Carstens H.: "Ein neues Verfahren zur Bestimmung des Stahlgewichts von Seedchiffen", Hansa, 104. Jahrgang, 1967, STG Sonderheft, pp. 1864-1874.
9. Carstens H.: "Bestimmung des Stahlgewichtes von Bulkcarriern und Containerschiffen", Hansa, 107. Jahrgang, 1970, Sondernummer STG, pp. 1945-1948.
10. Puchstein K., Vorausbestimmung der Masse und Lage des Massenmittelpunktes des Stahlschiffskorperes von "General-Cargo" – Schiffen, "Schiffbautechnik", 1961, №10, pp.496-504.

11. Schneekluth H., Bertram V. Ship Design for Efficiency and Economy / H. Schneekluth and V. Bertram. Butterworth-Heinemann. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP. Published 1987.
12. Hollenbach U. (1994). Method for estimating the steel- and light ship weight in ship design. ICCAS'94, Bremen, p. 4.17.
13. Harvald S. A., Jensen J. J. (1992). Steel weight estimation for ships. PRADS Conference, Newcastle. Elsevier Applied Science, p. 2.1047.
14. Watson D.G.M. Practical Ship Design. Elsevier Science Ltd. The Boulevard, Langford Lane. Kidlington. Oxford OX5 1GB, UK. Published 1998.
15. Papanikolaou A.. Ship Design Methodologies of Preliminary Design. Springer Science Business Media Dordrecht. Published 2014.
16. Степанов В.В., Суженис Э.Н. Способ определения веса металлического корпуса танкеров и сухогрузных судов, набранных по Правилам Регистра СССР // Общие вопросы проектирования судов: сборник // НТО судостроительной промышленности: материалы по обмену опытом. Вып. 199.- Л.: Судостроение, 1973. – С. 150-157.
17. Кочнев, Ю.А. Анализ нагрузки масс «малых» танкеров / Ю.А. Кочнев, Е.П. Роннов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.– Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010. – Выпуск 28. – с.42-51.
18. Дунь Синьшо. Определение нагрузки масс судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2015, №4, с.16-22.
19. Купальцева Е.В. Определение составляющих нагрузки масс «малых» пассажирских судов на начальном этапе проектирования. Вестник ВГАВТ, выпуск 45, 2015 г, с.181-188.
20. Егоров А.Г. Определение весовой нагрузки судов смешанного «Река-море» плавания нового поколения в начальной стадии проектирования. Морской вестник, №4(48), 2013, с.19-22.
21. Киреев В.Н. Мацкевич В.А. Рязанцев Ю.И. Справочник по нагрузке масс морских судов / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб., 2007 - 195 с.
22. D'Almeida, J. (2009), Arquitectura Naval -O Dimensionamento do Navio, , Lisboa: Prime Books. ISBN, 167 p.
23. Cudina, P.; Zanic, V., Preberg, P. Multiattribute Decision Making Methodology in the Concept Design of Tankers and Bulk-Carriers. Brodogradnja 1(1) 2010, pp.834-844.
24. Weight management software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://shipweight.com/> (дата обращения – 01.11.2023).
25. ОСТ 5Р.0206-2002. Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов. Классификация элементов судов, 2002. – 78 с.
26. Бубнов И.Г. Об одном методе определения главных размеров проектируемого судна. Пг., Ежегодник союза морских инженеров, 1916, т.1, с. 243-256.
27. Проектирование и постройка стальных торговых судов. Пер. с англ. под ред. Д. Арнота. Л., Судпромгиз, 1959.
28. Таровик О. В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Научный руководитель: доктор технических наук, Апполонов Е.М. СПб, 2015.
29. Siemens, Digital Industries Software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/> (дата обращения – 01.11.2023).
30. S. Ryumin, V. Tryaskin. Computer-Aided System for Parametric Design of Ship Hull Structures-CADS-Hull. Machines, MDPI, 2022, Vol. 10, Issue 4, p.262-282. DOI: 10.3390/MACHINES10040262.
31. Rhinoceros software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rhino3d.com/> (дата обращения – 01.11.2023).
32. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers; IACS: London, UK, 2021.
33. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила Классификации и постройки морских судов / РМРС. Часть 2 КОРПУС, 2022 г.

References

1. Demeshko G.F., Ryumin S.N. Normativno-pravovye i proektnye aspekty sozdaniya sovremennykh tankerov [Regulatory and Design Aspects of Modern Tanker Design]. Ch. 2. Morskoy vestnik. 2015. № 4 (56). с. 18-21.
2. V.N. Kireev, V.A. Matskevich, Yu.I. Ryazantsev. Raschet nagruzki mass i vodoizmeshcheniy sudna po izmeritelyam [Calculation of vessel mass breakdown and displacement using coefficients]. Morskoy vestnik, №4(20), 2006, с. 91-98.
3. Nogid L.M. Proektirovanie morskikh sudov. Chast' pervaya. Metodika opredeleniya elementov proektiruemogo sudna [Design of marine vessels. First Part: Methodology for determining the elements of the designed vessel.], L., Sudostroenie, 1964. – 361 с.
4. Nogid L.M. Teoriya proektirovaniya sudov [Ship design theory]. L., Sudpromgiz, 1955 – 480 с.
5. Ashik V.V. Proektirovanie sudov [Ship Design]. Uchebnik – 2-e izd., pererab. i dop. – L.:Sudostroenie, 1985. – 320 с..
6. Bronnikov A.V. Proektirovanie sudov [Ship Design] / Uchebnik – L.: Sudostroenie, 1991. – 320 с., ил.
7. Gaykovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov [Theory of design of displacement ships and vessels] / Monografiya v 2 t. T. 1 8. Opisanie sistemy «Korabl'». – SPb.: Izd-vo NITs MORINTEKh, 2014. – 819 с..
8. Carstens H.: "Ein neues Verfahren zur Bestimmung des Stahlgewichts von Seedchiffen", Hansa, 104. Jahrgang, 1967, STG Sonderheft, pp. 1864-1874.

9. Carstens H.: "Bestimmung des Stahlgewichtes von Bulkcarriern und Containerschiffen", Hansa, 107. Jahrgang, 1970, Sondernummer STG, pp. 1945-1948
10. Puchstein K., Vorausbestimmung der Masse und Lage des Massenmittelpunktes des Stahlschiffskorperes von "General-Cargo" – Schiffen, "Schiffbautechnik", 1961, №10, pp.496-504
11. Schneekluth H., Bertram V. Ship Design for Efficiency and Economy / H. Schneekluth and V. Bertram. Butterworth-Heinemann. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP. Published 1987.
12. Hollenbach U. (1994). Method for estimating the steel- and light ship weight in ship design. ICCAS'94, Bremen, p. 4.17
13. Harvald S. A., Jensen J. J. (1992). Steel weight estimation for ships. PRADS Conference, Newcastle. Elsevier Applied Science, p. 2.1047
14. Watson D.G.M. Practical Ship Design. Elsevier Science Ltd. The Boulevard, Langford Lane. Kidlington. Oxford OX5 1GB, UK. Published 1998.
15. Papanikolaou A.. Ship Design Methodologies of Preliminary Design. Springer Science Business Media Dordrecht. Published 2014.
16. Stepanov V.V., Suzhenis E.N. Sposob opredeleniya vesa metallichesкого korpusa tankerov i sukhogruzykh sudov, nabrannykh po Pravilam Registra SSSR [Method for determining the weight of the metal hull of tankers and dry cargo ships built according to the USSR Register Rules]. Obshchie voprosy proektirovaniya sudov: sbornik NTO sudostroitel'noy promyshlennosti: materialy po obmenu opytom. Vyp. 199.- L.: Sudostroenie, 1973. – С. 150-157
17. Yu.A. Kochnev, E.P. Ronnov. Analiz nagruzki mass «malykh» tankerov [Mass Elements Analysis of Small Tankers]. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta.– N. Novgorod: Izd.-vo FGOU VPO «VGAVT», 2010. – Vypusk 28. – с.42-51.
18. Dun' Sin'sho. Opredelenie nagruzki mass sudov-gazovozov LNG na nachal'nykh stadiyakh proektirovaniya [Determination of the mass elements of LNG gas carriers at the initial stages of design]. Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2015, №4, с.16-22.
19. Kupal'tseva E.V.. Opredelenie sostavlyayushchikh nagruzki mass «malykh» passazhirskikh sudov na nachal'nom etape proektirovaniya [Determination of the load components of the masses of "small" passenger ships at the initial design stage]. Vestnik VGAVT, vypusk 45, 2015 r, с.181-188.
20. Egorov A.G. Opredelenie vesovoy nagruzki sudov smeshannogo «Reka-more» plavaniya novogo pokoleniya v nachal'noy stadii proektirovaniya [Determination of the weight load of mixed river-sea navigation vessels of the new generation at the initial design stage]. Morskoy vestnik, №4(48), 2013, с.19-22.
21. Kireev V.N. Matskevich V.A. Ryazantsev Yu.I. Spravochnik po nagruzke mass morskikh sudov [Handbook of Mass Components for Marine Vessels] / TsNII im. akad. A.N. Krylova. SPb., 2007 - 195 с.
22. D'Almeida, J. (2009), Arquitectura Naval -O Dimensionamento do Navio, , Lisboa: Prime Books. ISBN, 167 p.
23. Cudina, P; Zanic, V., Preberg, P. Multiattribute Decision Making Methodology in the Concept Design of Tankers and Bulk-Carriers. Brodogradnja 1(1) 2010, pp.834-844
24. Weight management software. [Official Site]. – Available online: <http://shipweight.com/> (дата обращения – 01.11.2023).
25. OST 5R.0206-2002. Nagruzka mass grazhdanskikh i vspomogatel'nykh sudov. Klassifikatsiya elementov sudov [Mass Components of civil and auxiliary vessels. Classification of ship elements.], 2002. – 78 с.
26. Bubnov I.G. Ob odnom metode opredeleniya glavnykh razmerov proektiruemogo sudna [About one method for determining the main dimensions of a designed vessel]. Pg., Ezhegodnik soyuza morskikh inzhenerov, 1916, т.1, с. 243-256
27. Proektirovanie i postroyka stal'nykh togovykh sudov [Design and construction of steel merchant ships]. Per. s angl. pod red. D. Arnota. L., Sudpromgiz, 1959
28. Tarovik O. V. Metodika opredeleniya mass konstruktsey ledovykh usileniy transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya / Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Methodology for determining the masses of structures of ice reinforcements of transport ships at the early stages of design / Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Nauchnyy rukovoditel': doktor tekhnicheskikh nauk, Appolonov E.M. SPb, 2015.
29. Siemens, Digital Industries Software. [Official Site]. – Available online: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/> (data obrashcheniya – 01.11.2023)
30. S. Ryumin, V. Tryaskin. Computer-Aided System for Parametric Design of Ship Hull Structures-CADS-Hull. Machines, MDPI, 2022, Vol. 10, Issue 4, p.262-282. DOI: 10.3390/MACHINES10040262.
31. Rhinoceros software. [Official Site]. – Available online: <https://www.rhino3d.com/> (data obrashcheniya – 01.11.2023)
32. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers; IACS: London, UK, 2021.
33. Rules for the Classification and Construction of Sea-going Ships. Russian Maritime Register of Shipping, 2022. Part 2 HULL.

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

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

Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Ship Design Department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rumin@smtu.ru

Барановский Борис Олегович, аспирант кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: baranovski.boris@gmail.com

Boris O. Baranovskii, Postgraduate student, Ship Design Department, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: baranovski.boris@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 26.04.2024.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.003>**Направления развития методов оптимизации проектных элементов и характеристик транспортных судов**Роннов Е.П.¹ ptps@vgavt-nn.ru, Кочнев Ю.А.¹ tmnnkoch@mail.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Проектирование судна на начальном этапе достаточно часто выполняется методами оптимизации с применением математических моделей, построенных с применением статистики и приближённых регрессионных уравнений. К моменту разработки рабочей и конструкторской документации для постройки, в составе проекта накопится обширный ряд отличий от начальной модели, вызванный требованиями норм классификационного общества, особенностями конструкции и принятыми проектантом решениями, которые совместно изменят критерии оценки судна. При оптимизации в области экстремальных значений экономической целевой функции перечисленные отличия могут существенно превышать её диапазон изменения, что требует введения дополнительного показателя для выбора предпочтительного варианта судна, в качестве которого в работе принят потенциал технической безопасности, отражающие наличия запаса по мореходным качествам, опасным с точки зрения развития аварии. Учесть отличия проектных характеристик от изначально принятых в модели, на этапе обоснования главных размерений возможно решением интервальной задачи, частный вариант которой для грузового судна типа Волго-дон-макс рассмотрен в работе.

Ключевые слова: техническая безопасность судна, оптимизация, интервальная задача

Для цитирования: Роннов Е.П., Кочнев Ю.А. Направления развития методов оптимизации проектных элементов и характеристик транспортных судов, Морские интеллектуальные технологии 2024. № 2 часть 1, С. 33—37. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.003

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.003>**Directions of development of methods for optimization of design elements and characteristics of transport vessels**Evgeny P. Ronnov¹ ptps@vgavt-nn.ru, Yury A. Kochnev¹ tmnnkoch@mail.ru¹Volga State University of Water Transport

Abstract. The design of a vessel at the initial stage is quite often performed by optimization methods using mathematical models constructed using statistics and approximate regression equations. By the time the working and design documentation for the construction is developed, the project has accumulated an extensive number of differences from the initial model caused by the requirements of the classification society standards, design features and decisions taken by the designer, which together will change the criteria for evaluating the vessel. When optimizing in the field of extreme values of the economic objective function, the listed differences may significantly exceed its range of change, which requires the introduction of an additional indicator to select the preferred variant of the vessel, as which the technical safety potential is accepted in the work, reflecting the availability of a margin for seaworthiness dangerous from the point of view of the development of an accident. Take into account the differences in design characteristics from those originally adopted in the model

Keywords: technical safety of the vessel, optimization, interval task

For citation: Evgeny P. Ronnov, Yury A. Kochnev Directions of development of methods for optimization of design elements and characteristics of transport vessels, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 33—37. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.003

Введение

Проектирование и постройка судна в конечном счёте направлены на создание технического объекта, имеющего высокие показатели эффективности, которые в общем случае зависят от конечного оптимального сочетания проектных элементов и характеристик судна. При этом уровень различных качеств, нормируемых Правилами классификационных обществ (остойчивости, непотопляемости, прочности и т.д.) выступает в виде ограничений в математических моделях проектируемого судна.

Для транспортного судна критерием, как правило, являются различные экономические показатели,

такие как прибыль, расходы в абсолютном или относительном виде, срок окупаемости, приведённые затраты и т.д. Величина их значений, определяемая в оптимизационных задачах данного уровня является условно прогнозируемой и поэтому приближённой, так как на этом этапе сложно учесть реальную динамику ценообразования, загрузку и технологический уровень предприятий судостроения, а главное вероятность соответствия транспортной работы эксплуатируемого судна в течении одной навигации и, тем более, всего жизненного цикла, схеме, предусмотренной математической моделью.

То есть решение задачи на начальных этапах проектирования в наиболее распространённой

постановке [1,2], когда по известным исходным данным, выбираются такие элементы судна, что бы функция цели в виде экономического критерия эффективности принимала экстремум (максимум или минимум в зависимости от типа критерия и решаемой задачи), не всегда соответствует реальности. Кроме того, функция эффективности в районе оптимальных значений имеет пологий характер, отражающий слабую её чувствительность в некотором диапазоне к варьируемому параметру. Это, с одной стороны, позволяет полагать, что модель косвенно будет учитывать возможное многообразие отмеченных выше реальных условий, а с другой стороны принимать решения, имеющие более высокие характеристики по уровню технической безопасности, то есть обеспечивать её запас, например, по основным мореходным качествам. В таком случае задача принимает многокритериальный характер [3].

Структура потенциала технической безопасности судна

Наиболее общие требования к безопасности судна изложены в Техническом регламенте об безопасности объектов внутреннего водного

транспорта. Конкретные решения по обеспечению технической безопасности регламентируются Правилами Российского Классификационного общества (РКО). Последние, не имея единого интегрального показателя для её оценки, используют критерий предельного удовлетворения требований Правил по различным, прежде всего, мореходным качествам судна, без учета показателя конечного уровня этого удовлетворения. Это не позволяет оценивать их возможный запас при оптимизации элементов, проектировании и эксплуатации.

Показателем оценки такого уровня может быть принята величина превышения фактических значений характеристики того или иного качества над нормируемым или опасным значением, что далее будем называть потенциалом технической безопасности (ПБ) [4], представляющим собой совокупность частных потенциалов, соответствующих нормируемым отдельным качествам судна. Формирование ПБ можно представить в виде схемы (рисунок 1), отражающей вероятность и тяжесть последствий при различных возможных авариях судов.

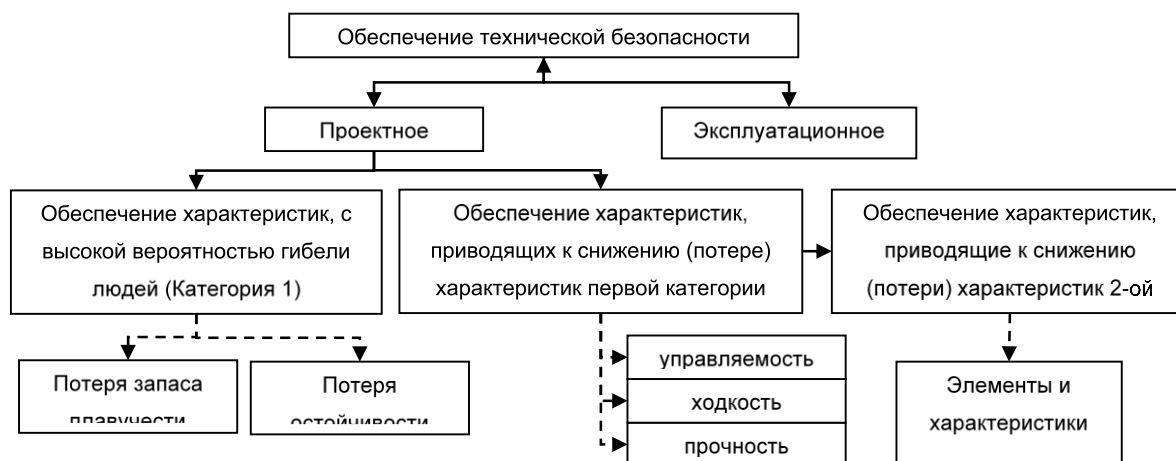


Рис. 1 – Формирование потенциала безопасности

В международной практике в качестве одних из видов классификации аварий выделяют: навалы, столкновение, пожар или взрыв, посадка на грунт, потеря остойчивости, потеря или снижение плавучести за безопасные пределы. Наиболее низкую вероятность аварии имеет потеря остойчивости и запаса плавучести, однако, они при этом имеют наиболее тяжёлые последствия, так как процент гибели людей и вероятность потери груза в них составляет более 50%. Тогда как наибольшая вероятность аварий наблюдается в результате столкновений и пожаров или взрывов. Однако они характеризуются практически двухкратно меньшим процентом гибели людей, но в ряде случаев высокими экономическими потерями, а их причинами прямо или косвенно являются особенности эксплуатации и человеческий фактор. Поэтому обеспечение запаса основных мореходных качеств, составляющих главное содержание уровня технической безопасности судно актуально.

Это позволяет к первой категории характеристик качеств, влияющих на потенциал безопасности

отнести потерю запаса плавучести и потерю запаса остойчивости. Ко второй категории – потерю управляемости, ходкости и прочности, которые в большей степени приводят не к самой аварии, а к снижению характеристик первой категории. Снижение характеристик основных подсистем судна приводит к полному исчерпанию плавучести и остойчивости они не в состоянии – обозначим их показателями третьей категории.

Исходя из отмеченного, потенциал технической безопасности судна можно представить в виде аддитивно-мультипликативного критерия, отражающего взаимное влияние частных потенциалов технической безопасности: остойчивости, плавучести, управляемости, ходкости, прочности, минимального времени эвакуации из надстройки, безопасности и надёжности якорной стоянки:

$$ПБ = \left(\sum_{i=1}^2 \Gamma_i^I \times \beta_i \times \Gamma_i^{II} \right) \times \beta^{III},$$

где Γ_i^I – i -ый частный показатель технической безопасности судна I-ой категории;

Γ_i^{II} – i -ый частный показатель технической безопасности судна II-ой категории;

β_i – весовые коэффициенты категории технической безопасности;

β^{III} – интегральный коэффициент влияния показателей безопасности третьей категории.

Выполненный расчёт и анализ общего и частных ПБ для трёх судов приведён в таблице 1.

Таблица 1

Расчёт потенциала технической безопасности для существующих судов

Вид частного потенциала технической безопасности	Танкер пр.19614	Сухогруз, пр.RSD44	Комбинированно е, пр RST54
Потенциал безопасности по остойчивости	6,4	5,2	2,6
Потенциал безопасности по запасу плавучесть	1,98	2,08	1,87
Потенциал безопасности по прочности	1,31	1,07	1,36
Потенциал безопасности надстройки	1	0,06	1
Потенциал безопасности на якорной стоянке	0,35	0,35	0,35
Общий потенциал безопасности	3,87	0,75	1,94

Наибольший потенциал безопасности из рассмотренных судов имеет нефтеналивной танкер проекта 19614, что можно объяснить следующими факторами: при ходе судна «в грузу» влияние перемещения жидкого груза мало (в связи с наполненностью танков на 96%); рассмотренный танкер имеет большую высоту надводного борта и, следовательно, большую составляющую потенциала безопасности – плавучесть.

Существенно снижение потенциала безопасности на всех рассмотренных судах связано с применением якоря Холла, имеющего меньшую держащую силу по сравнению с якорями ПДС или AC-14, а на судне проекта RSD 44 перенос рулевой рубки в носовую часть понижает еще и потенциал надстройки судна, в связи со значительным увеличением времени эвакуации экипажа с судна.

Таким образом, выполнив подобный анализ величины ПБ при обосновании судна на основе экономико-математического моделирования можно принять решение по управлению частными ПБ в пределах пологого участка изменения функции цели.

Многокритериальное обоснование характеристик судна с интервальными параметрами технических решений

Проектирование нового судна, при фиксированных главных размерениях, в последующем, например, на стадии эскизного и технического проекта может изменить ряд проектных элементов и характеристик по сравнению с значениями, принятыми в математической модели, что переведёт задачу оптимизации в разряд с интервальной неопределённостью [5, 6]. Тогда в окончательном проекте судна проектные характеристики и критерии эффективности могут принять любое значение на некотором заранее известном интервале, причем с равной вероятностью.

При этом границы данного интервала при некотором сочетании внешних и внутренних параметров математической модели могут иметь экстремум в разных точках числовой оси независимого варьируемого параметра (рисунок 2). В таком случае оптимальный вариант судна выбирается не по границам интервала, а по взаимному расположению самих интервалов. Если меньшая граница первого интервала превышает

большую границу второго, то однозначно считается, что первый интервал больше. В случае частичного перекрытия двух интервалов наибольший принимается, например, по среднему значению. Для реальной проектной задачи можно считать, что в диапазоне пока верхняя граница интервала критерия эффективности в задаче максимизации лежит выше максимального значения нижней границы критерия, целевая функция слабо чувствительна к изменению параметра.

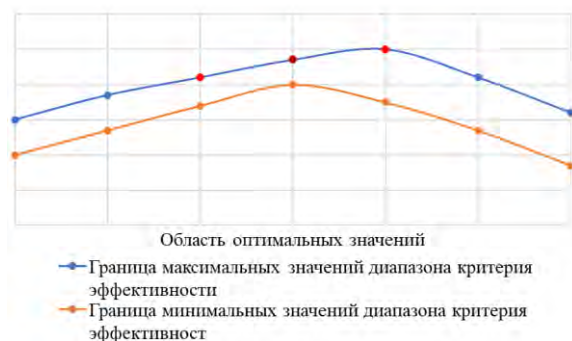


Рис.2 – Зависимость границ критерия эффективности в интервальной задаче

Например, на рисунке 3 по результатам выполненных расчётов приведены нижняя и верхняя границы критерия эффективности относительная прибыль судна с различными значениями коэффициента общей полноты δ , при изменении положения центра масс на судне, размеров отсеков, элементов конструкции корпуса, решений в планировке надстройки и выбранных судовых устройствах при проектировании судна типа «Волгодон-макс» на максимальную грузоподъёмность [7,8]

$$\Pi'_{\min(\max)} = \frac{\Pi_{\min(\max)}}{\Pi},$$

где $\Pi_{\min(\max)}$ – минимальное (максимальное) значение диапазона прибыли судна;

Π – нормируемое значение прибыли.

То есть в зависимости от принятых конструктором решений, которые не могут быть проанализированы при обосновании главных размерений судна, показатель экономической эффективности на всем диапазоне варьирования независимых параметров

получается в виде интервала. Однако на практике изменения оптимальных элементов могут быть существенно большими и не учитывать их становится не допустимым. Последнее, в первую очередь, будет иметь значение при учете интервальных величин не только в технических характеристиках судна, но и в экономических параметрах, таких как диапазон стоимости материалов, рабочей силы, отпускной стоимости судна, фрахтовой ставки, партионности груза и др.

Изменение экономического критерия, в рассмотренном случае, показывает существенное увеличение. Оно обуславливается ростом дохода судна от перевозки большего количества груза. Однако нижняя граница интервала относительной прибыли при большем значении коэффициента общей полноты меньше верхней границы интервала при меньшем значении δ . То есть в районе экстремума так же оправдано применение двухкритериальной оптимизации.

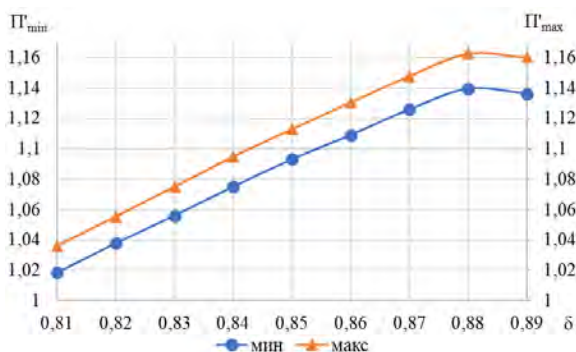


Рис. 3 – Зависимость границ интервала значений прибыли при различном коэффициенте δ

Для выбора более эффективного судна, в таком случае, целесообразно использовать многокритериальную оптимизацию методом уступок [9, 10] по первому (экономическому критерию), а в качестве второго критерия применить рассмотренный выше потенциал безопасности, который также будет иметь интервальный вид (рисунок 4)

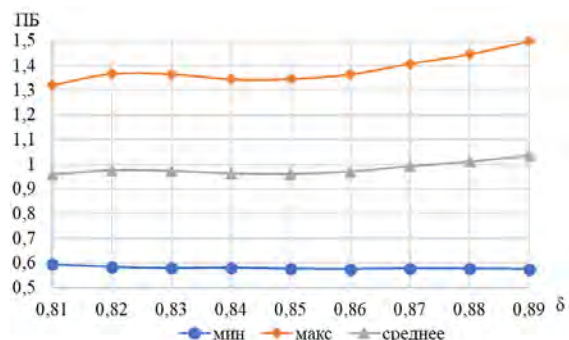


Рис. 4 – Зависимость границ и среднего значения интервала потенциала безопасности при различном коэффициенте δ .

Нижняя граница потенциала безопасности показывает устойчивое снижение с ростом общей полноты, однако в районе максимального экономического критерия это снижение менее 1%. Верхняя граница ПБ показывает рост на уровне 6%, что обеспечивает увеличение и медианных значений. То есть не смотря на меньшее значение экономического критерия при коэффициенте общей полноты 0,89, можно рекомендовать за оптимальный принимать именно его величину, что приведёт к обеспечению большей технической безопасности.

Заключение

Полученные в работе численные данные для судна типа Волго-Дон-макс позволяют сделать вывод, что отдельные технические решения, которые принимаются на различных этапах проектирования не существенно сказываются на экономическом критерии эффективности. Однако другая тенденция наблюдается для технических показателей оценки проекта, в частности потенциала безопасности, отражающий запас мореходных качеств. По нашему мнению, подобные зависимости будут и судов других типов и классов. Это обстоятельство необходимо учитывать особенно при выборе и обосновании главных размерений, поскольку их корректировка на последующих этапах бывает практически невозможна.

Литература

1. Ашик В.В. Проектирование судов. Учебник. – Л.: Судостроение, 1985. 320 с.
2. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980. – 240 с
3. Зорин, А. А. Многокритериальная оптимизация судовых устройств и их элементов / А. А. Зорин, Д. А. Миролюбов, В. В. Кузнецова // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 71. – С. 46-53. – DOI 10.37890/jwt.vi71.250.
4. Кочнев, Ю. А. Потенциал безопасности грузового судна / Ю. А. Кочнев // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 4(53). – С. 32-41. – DOI 10.24866/2227-6858/2022-4/32-41
5. Левин, В. И. Задача решения уравнения в интервальной постановке / В. И. Левин // Вестник тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22, № 5-2. – С. 1172-1178. – DOI 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1172-1178.
6. Левин, В.И. Сравнение интервалов и оптимизационные задачи с интервальными параметрами / В.И. Левин // Радиоэлектроника, информатика, управления. – 2001. - №2 – с. 57-62
7. Гуляев, И. А. Влияние параметров оптимизационной модели на основные характеристики архитектурно-конструктивного типа комбинированного судна / И. А. Гуляев, Е. П. Роннов, Ю. А. Кочнев // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 72. – С. 15-29. – DOI 10.37890/jwt.vi72.275.
8. Егоров, Г.В. Сухогрузные суда «волго-дон макс» класса с пониженным надводным габаритом / Г.В. Егоров, Н.В. Автутов // Вісник ОНМУ. - Одеса: ОНМУ, 2013. - Вип. 1 (37). - С. 124-151
9. Калугин, Ю. Б. Решение двухкритериальной задачи методом пропорциональных уступок для критериев разной значимости / Ю. Б. Калугин // Специальная техника и технологии транспорта. – 2019. – № 4(42). – С. 85-89.

10. Китаев, М. В. Решение задачи оптимизации характеристик судна методом последовательных уступок / М. В. Китаев, И. А. Новосельцев, В. А. Староверова // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 1(54). – С. 50-57. – DOI 10.24866/2227-6858/2023-1/50-57.

References

1. Ashik V.V. Proektirovanie sudov [Ship design]. Uchebnik. – L.: Sudostroenie, 1985. 320 c.
2. Khudyakov L.Yu. Issledovatel'skoe proektirovanie korabley [Research design of ships]. – L.: Sudostroenie, 1980. – 240 s
3. Zorin, A. A. Mnogokriterial'naya optimizatsiya sudovykh ustroystv i ih jelementov [Multicriteria optimization of ship devices and their elements] / A. A. Zorin, D. A. Mirolyu-bov, V. V. Kuznecova // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2022. – № 71. – S. 46-53.
4. Kochnev, Yu. A. Potentsial bezopasnosti gruzovogo sudna [Cargo ship safety potential] / Yu. A. Kochnev // Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. – 2022. – № 4(53). – S. 32-41. – DOI 10.24866/2227-6858/2022-4/32-41
5. Levin, V. I. Zadacha resheniya uravneniya v interval'noy postanovke [The problem of solving the equation in the interval formulation] / V. I. Levin // Vestnik tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2017. – T. 22, № 5-2. – S. 1172-1178. – DOI 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1172-1178.
6. Levin, V.I. Sravnenie intervalov i optimizatsionnye zadachi s interval'nymi parametrami [Interval comparison and optimization tasks with interval parameters] / V.I. Levin // Radioelektronika, informatika, upravlinnija. – 2001. - №2 – s. 57-62
7. Gulyaev, I. A. Vliyanie parametrov optimizatsionnoy modeli na osnovnye kharakteristiki arkhitekturno-konstruktivnogo tipa kombinirovannogo sudna [The influence of optimization model parameters on the main characteristics of the architectural and structural type of a combined vessel] / I. A. Gulyaev, E. P. Ronnov, Yu. A. Kochnev // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2022. – № 72. – S. 15-29. – DOI 10.37890/jwt.vi72.275.
8. Egorov, G.V. Suhogruznye suda «volgo-don maks» klassa s ponizhennym nadvodnym gabaritom [Volga-don Max class dry cargo vessels with reduced surface dimensions] / G.V. Egorov, N.V. Avtutov // Visnik ONMU. - Odesa: ONMU, 2013. - Vip. 1 (37). - S. 124-151
9. Kalugin, Yu. B. Reshenie dvukhkriterial'noy zadachi metodom proporsional'nykh ustupok dlya kriteriev raznoy znachimosti [Solving a two-criterion problem by the method of proportional concessions for criteria of different significance] / Yu. B. Kalugin // Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta. – 2019. – № 4(42). – S. 85-89.
10. Kitaev, M. V. Reshenie zadachi optimizatsii harakteristik sudna metodom posledovatel'nykh ustupok [Solving the problem of optimizing ship characteristics by the method of successive concessions] / M. V. Kitaev, I. A. Novosel'cev, V. A. Staroverova // Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. – 2023. – № 1(54). – S. 50-57.

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

Роннов Евгений Павлович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии постройки судов Волжского государственного университета водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Evgeny P. Ronnov Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Кочнев Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов Волжского государственного университета водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Yury A. Kochnev, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Chair of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 05.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.04.2024.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.561.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.004>

Исследования эволюции ледового судоходного канала

Карулин Е.Б.^{1,2} evgeny.b.k@gmail.com, Карулина М.М.² m_karulina@ksrc.ru,

Жугина Е.В.¹ zhugina.katia@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Крыловский государственный научный центр

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических исследований эволюции поперечного сечения ледового судоходного канала в течение его эксплуатации. Многократное использование судоходных каналов, проложенных в ледяном покрове, приводит к накоплению в них ледяной каши – смеси мелких обломков льда и воды – и последующему ее смерзанию. Эти процессы негативно сказываются на ходкости судов, следующих по каналу, что обусловило интерес к изучению указанной проблемы. Ранее разработанные теоретические модели эволюции ледового канала являются полуэмпирическими и используют результаты натурных измерений в регионах с мягкими или умеренными ледовыми условиями. Целью настоящих исследований было предложить расчетную модель эволюции ледового канала, которую можно применить к суровым ледовым условиям Арктики. Процессы теплообмена на границах воздух-лед и лед-вода, смерзания и накопления льда в канале математически описаны с использованием законов термодинамики и задачи Стефана. В расчетной схеме учтено перемещение части ледяной каши под кромки канала. Разработанная модель применена для исследования эволюции ледового канала в северной части Обской губы при различной интенсивности прохождения судов по нему. Имеющиеся отдельные измерения толщины слоя ледяной каши, сделанные экипажами судов при движении по ледовому каналу в припае Обской губы, хорошо соотносятся с полученными расчетными оценками. Описанный алгоритм прогнозирования геометрии ледового канала может быть использован при решении логистических задач движения транспортных судов в арктических водах, если часть их маршрутов включает ледовые каналы.

Ключевые слова: Навигация, ледовый канал, ледяная каша, консолидированный слой, пористость, теплообмен, задача Стефана, Обская губа.

Для цитирования: Карулин Е.Б., Карулина М.М., Жугина Е.В. Исследования эволюции ледового судоходного канала, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 38—47. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.004

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.004>

Study of navigable ice channel evolution

Evgeny B. Karulin^{1,2} evgeny.b.k@gmail.com, Marina M. Karulina² m_karulina@ksrc.ru,

Ekaterina V. Zhugina¹ zhugina.katia@yandex.ru

¹St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation, ²Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper introduces results of investigation into evolution of navigation channel' cross-section during its operation. Multiple use of navigation channels made in ice cover leads to accumulation of brash ice – a mixture of small ice pieces and water – therein with its subsequent consolidation. These processes negatively affect the performance of ships sailing through the channel, which has led to interest in studying this problem. Previously developed theoretical models of ice channel evolution are semi-empirical and use the results of field measurements in regions with mild or moderate ice conditions. The goal of the present studies was to propose a computational model of ice channel evolution that can be applied to the severe ice conditions of the Arctic. The processes of heat exchange at the air-ice and ice-water boundaries, freezing and accumulation of ice in the channel are mathematically described using the laws of thermodynamics and the Stefan problem. The calculation scheme takes into account a partial relocation of brash ice beneath the ice channel edges. The developed model was used to study the evolution of the ice channel in the northern part of the Ob Bay at different intensities of vessel passage through it. Some available measurements of the brash ice thickness, made by the ship crews while moving through the channel in the Ob Bay fast ice, correlate well with the obtained calculation results. The described algorithm for predicting the ice channel geometry can serve to ensure logistical tasks for the movement of transport vessels in Arctic waters, if part of their routes includes ice channels.

Keywords: navigation, ice channel, brash ice, consolidated layer, porosity, heat transfer, Stefan problem, Ob Bay

For citation: Evgeny B. Karulin, Marina M. Karulina, Ekaterina V. Zhugina Study of navigable ice channel evolution. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 38—47. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.004

Введение

При следовании по маршрутам в акватории Северного морского пути (СМП) судам приходится преодолевать участки сплошного ледяного покрова по проложенным в нем ледовым судоходным каналам. Многократное использование ледовых каналов при низких температурах и постоянном взламывании ледяного покрова приводит к накоплению в них ледяной каши, представляющей собой смесь мелких обломков льда и воды, и последующему ее смерзанию. Эти процессы негативно сказываются на ходкости судов, следующих по каналу, что обусловило необходимость подробного изучения происходящих явлений. С середины 70-х годов прошлого столетия было разработано и предложено несколько теоретических моделей эволюции ледового канала, представленных в работах [1]-[7]. Были обозначены два основных фактора, влияющих на текущее состояние ледового канала: количество градусодней мороза в месте расположения канала и частота прохода судов по каналу.

Практически все модели накопления и смерзания льда в канале рассматривают классическую задачу Стефана о перемещении границы раздела жидкой и твердой (лед) фаз воды, базирующуюся на решении уравнений теплопроводности [8]. Применительно к вопросу о ледовых каналах в качестве исходной среды рассматривается не вода, а ледяная каша, и, соответственно, речь идет о перемещении границы двух фаз – ледяной каши и консолидированного слоя. В такой постановке задача Стефана рассмотрена в работе [9] и используется в настоящей работе для определения толщины консолидированного слоя в канале в зависимости от потока холода.

Следует отметить, что разработанные к настоящему времени модели эволюции ледового судоходного канала являются полуэмпирическими. Для оценки значений эмпирических коэффициентов, входящих в предложенные формулы, используются результаты натурных измерений в регионах с мягкими или умеренными ледовыми условиями: большинство расчетных моделей ориентировано на ледовые условия Балтийского моря. Некоторые результаты натурных измерений поперечных профилей судоходных каналов в Балтийском регионе приведены в работах [10], [11], [12]. Такой подход ограничивает универсальность предложенных расчетных моделей, поскольку эмпирические коэффициенты, определенные из условия соответствия полевым измерениям, позволяют рассчитывать количество ледяной каши только для каналов, условия формирования которых (термодинамический режим и график судопроходов) аналогичны условиям формирования канала, в котором производились измерения.

В связи с освоением морских арктических территорий возникла необходимость исследовать вопрос применительно к суровым ледовым условиям Арктики. Модель эволюции ледового канала, представленная в работе [10], ориентирована, в том числе, на регионы с суровыми ледовыми условиями и была опробована для исследования нарастания толщины льда в каналах, проложенных в Обской губе. Однако отсутствие данных измерений профилей судоходных каналов в акваториях с

суровым холодным климатом обусловило необходимость использования имеющихся результатов измерений на Балтике [10] для введения поправочного коэффициента при расчете толщины ледяной каши, как показано ниже.

Общим недостатком рассмотренных расчетных моделей эволюции каналов является пренебрежение горизонтальным перемещением ледяной каши перпендикулярно оси канала при движении судна, что приводит к удалению части льда из канала под его кромки и формированию ледяных торосистых гряд по кромкам. Этот процесс наблюдается в натурных условиях, и он, вероятно, вызван не только смещением битого льда корпусом судна, но и движителями. На рисунке 1 показано (а) реальное поперечное сечение канала и (б) прямоугольное поперечное сечение расчетной модели Сэндквиста [4] с использованием так называемой "эквивалентной" толщины льда, которая представляет собой толщину льда, осредненную по ширине, в предположении, что весь битый лед скапливается в канале.

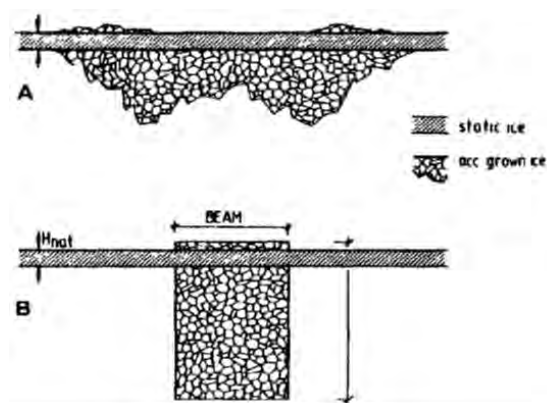


Рис. 1 – Поперечное сечение ледового канала [4]

Измерения фактической средней толщины льда в ледовом канале в течение нескольких зимних сезонов на Балтике показали, что она меньше эквивалентной толщины примерно в 2 раза [10]. Это соотношение принято в модели [6], где также используется понятие «эквивалентной» толщины ледяной каши.

В статье [9] предложена расчетная схема, позволяющая учесть процессы формирования торосистых гряд по кромкам канала.

За исключением расчетной схемы Ettema и Huang [7], в перечисленных выше моделях не рассматривалось влияние формы обводов корпуса судна, движущегося по каналу, на процесс накопления ледяной каши в нем. Такой анализ был выполнен в работе [13] на примере эволюции ледовых каналов на трассе Диксон – Дудинка в припайном льду р. Енисей, Россия. Было показано, что применение на ледоколах типа «Капитан Сорокин» специальной формы носовой оконечности, обладающей повышенными ледоочистительными свойствами, может привести к необходимости прокладки большего числа ледовых каналов на р. Енисей, чем при использовании традиционной формы носа ледокола. Объясняется это тем, что практически полная очистка ото льда канала после прохождения ледокола способствует ускоренному накоплению льда в нем за счет быстрого замерзания

открытых пространств воды в условиях низких температур воздуха.

В настоящей работе на основе усовершенствованной аналитической модели эволюции ледового канала, описанной в [9], выполнены расчеты изменения геометрии поперечного сечения канала в течение всего зимнего периода при гидрометеорологических данных по природным условиям в северной части Обской губы и при различной интенсивности прохождения судов по нему.

1. Построение аналитической модели эволюции ледового канала

1.1. Общее описание задачи

Ниже приведены понятия и определения, использованные в настоящей работе.

Ледовый судоходный канал – проход в сплошном ледяном покрове, образующийся после прохождения судов или других плавучих средств, предназначенных для разрушения льда. Геометрия поперечного сечения ледового канала схематично показана на рисунке 2. Судоходная часть ледового канала заполнена ледяной кашей, верхний слой которой при низкой температуре смерзается, образуя консолидированный слой.

Ледяная каша представляет собой скопление обломков плавучего льда не более 2 м в поперечнике, образовавшихся в результате разрушения других форм льда [14].

По кромкам ледового судоходного канала формируются торосистые гряды (брустверы), состоящие из беспорядочного нагромождения обломков льда.

В данной работе используются следующие обозначения характерных геометрических параметров канала (рисунок 2):

W_{ch} – ширина судоходной части канала;

W_{max} – габаритная ширина канала,

определяемая с учетом торосистых гряд по его кромкам;

h_{ice} – толщина окружающего ровного льда;

h_{ch} – толщина слоя льда в канале;

h_{cons} – толщина консолидированного слоя льда в канале;

H_{br} – максимальная высота ледяных скоплений (бруствера) под кромками канала;

L_{1-br} – протяженность ледяного бруствера под кромкой канала в наружную от канала сторону;

L_{2-br} – протяженность ледяного бруствера под кромкой канала внутрь канала;

L_{max-br} – отстояние максимальной высоты бруствера от кромки канала;

α – угол естественного склона обломков льда.

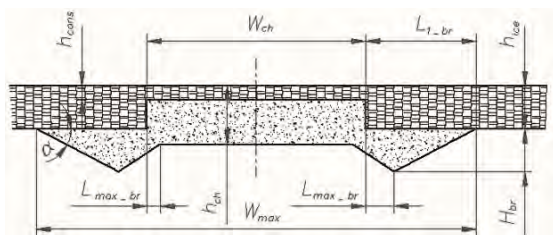


Рис. 2 – Схема поперечного сечения судоходного канала во льду

Изучение эволюции ледового канала включает в себя несколько задач, описание которых приводится ниже. К этим задачам относятся:

- исследование термодинамических процессов роста льда в канале;
- разработка схемы формирования ледового канала;
- определение геометрических параметров поперечного сечения канала.

1.2. Термодинамический процесс роста льда в канале

Рассмотрим процесс образования льда в канале. Общая схема термодинамического процесса приведена на рисунке 3. Нарастание льда за счет кристаллизации воды или смерзания ледяной каши в естественных условиях происходит под действием нескольких факторов, обозначения которых приведены на схеме:

Q_w – поток тепла, обусловленный ветром;

Q_{in} – поток радиационного тепла из атмосферы в снег и лед;

Q_{out} – поток радиационного тепла из льда и снега в атмосферу;

T_a – температура воздуха;

T_s – температура на верхней поверхности

снежного покрова;

T_u – температура на верхней поверхности льда;

T_f – температура замерзания воды.

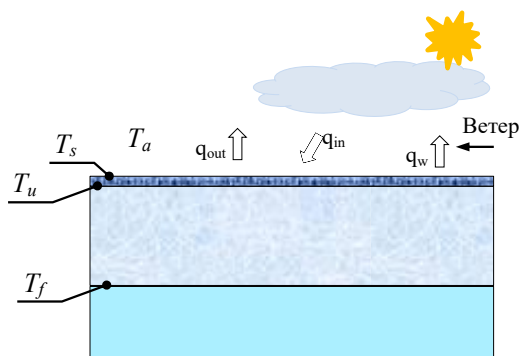


Рис. 3 – Схема термодинамических процессов при формировании ледового канала

Задачу образования льда в канале схематизируем следующим образом. При первом прохождении судна сплошной лед (рисунок 4а) взламывается судном, и канал заполняется битым льдом с пористостью p . В реальных условиях подобная картина наблюдается после нескольких проходов судна, первые проходы сопровождаются образованием достаточно крупных обломков льда. Для упрощения пренебрежем этой особенностью. Перед последующими проходами судна канал заполнен ледяной кашей, поверх которой образован консолидированный слой. В общем случае распределение температуры по толщине льда в канале имеет вид, показанный на рисунке 4б. Считаем, что после прохождения судна ледяная каша распределена по сечению канала равномерно, при этом ее температура равна средней температуре разрушенного льда T_m (Рисунок 4с).

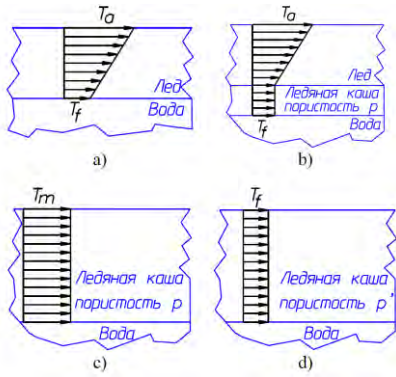


Рис. 4 – Принятая схема температурного режима льда в канале

Полагаем, что скрытая теплота кристаллизации ледяной каши H_{sl} равна:

$$H_{sl} = p \times H_w, \text{ [Дж/кг]}, \quad (1)$$

где H_w – скрытая теплота кристаллизации воды [Дж/кг].

Средняя температура шуги T_m ниже температуры замерзания пресной воды. За счет этого будет происходить кристаллизация воды в ледяной каше и снижаться пористость ледяной каши. Считаем, что это происходит моментально, средняя температура ледяной каши при этом становится равной T_f (Рисунок. 4d). Для определения изменившегося значения пористости вычислим запас "холода" в единичном объеме ледяной каши:

$$J = c_i \cdot m_i \cdot (T_m - T_f), \quad (2)$$

где c_i – удельная теплоемкость льда; m_i – масса льда в ледяной каше; ρ_i – плотность льда.

$$m_i = (1 - p) \cdot \rho_i \quad (3)$$

Количество льда, образующегося при кристаллизации воды в ледяной каше за счет запаса "холода" в ней можно оценить как:

$$m'_i = \frac{J}{H}. \quad (4)$$

Тогда новое значение пористости единичного объема будет:

$$p' = 1 - \frac{m_i + m'_i}{\rho_i}. \quad (5)$$

При большом запасе холода в исходном льду может произойти полная консолидация воды в каше ($p' = 0$). На рисунке 5 показаны графики изменения пористости ледяной каши в зависимости от разности средней температуры исходного льда и температуры кристаллизации воды при различных значениях исходной пористости.

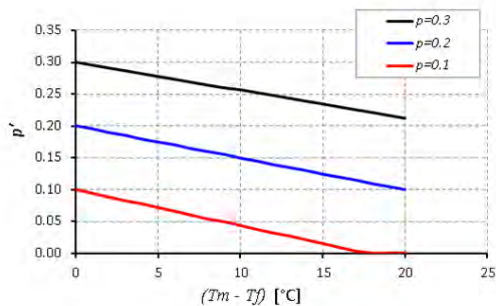


Рис. 5 – Изменение пористости ледяной каши в зависимости от разности средней температуры исходного льда и температуры кристаллизации воды при различных значениях исходной пористости.

Для изучения термодинамических процессов, происходящих в канале, последовательно рассмотрены две задачи:

1) трехмерная задача распространения тепла в ледяном покрове на поверхности воды

2) одномерная задача формирования консолидированного слоя из ледяной каши с заданной пористостью.

Вводятся следующие допущения и упрощения:

- поток тепла через нижнюю границу вода-лед отсутствует;

- снег на поверхности льда отсутствует – это допущение вводится на основании того, что при высокой частоте проходов по каналу не успевает сформироваться существенный снежный покров;

- температура верхней поверхности льда равна температуре воздуха;

- изменение температуры воздуха происходит медленно и профиль температуры во льду имеет линейный характер (Рисунок 4а): средняя температура льда будет равна

$$T_m = \frac{T_a - T_f}{2} \quad (6)$$

- вода и лед являются пресными;

- теплоперенос осуществляется только теплопередачей (адвективный, конвективный перенос тепла отсутствует, отсутствует также и лучистая передача энергии);

- отток тепла за счет ветра отсутствует.

Уравнение теплопроводности в этом случае выглядит следующим образом [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \nabla(k \nabla T) + Q, \quad (7)$$

где T – температура, градус; ρ – плотность среды, кг/м³; c – удельная теплоемкость среды, Дж/кг °С; k – коэффициент теплопроводности среды, Вт/м °С; Q – интенсивность источников тепла, Вт/м³;

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right). \quad (8)$$

Учитывая изотропность свойств среды и их постоянство, можно записать уравнение в следующем виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad (9)$$

При отводе тепла от воды через ледяной покров в атмосферу происходит замерзание воды на нижней поверхности ледяного покрова и его рост по толщине. С учетом выделения тепла кристаллизации уравнение (9) примет следующий вид:

$$(\rho c + \rho_i H \delta(T - T_f)) \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad (10)$$

где $\delta(\dots)$ – дельта-функция Дирака; H – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг.

Полагается, что среда, описываемая этим уравнением, при температуре ниже температуры замерзания воды T_f имеет свойства льда (c_i , k_i и ρ_i), а при более высокой температуре – свойства воды (c_w , k_w и ρ_w).

Используя уравнение (10), можно перейти к одномерной задаче о промерзании воды и кусков льда, имеющих одинаковую начальную температуру (температуру замерзания) T_f , температуру на верхней поверхности T_a (температуру воздуха) и пористость p [16]. Полагая, что смесь занимает нижнее полупространство $z < 0$, можно записать уравнение и граничные условия для описания нарастания консолидированного слоя:

$$T = T_a \text{ при } z = 0 \quad (11)$$

$$T = T_f, \rho_i p H \frac{dh}{dt} = -k_i \frac{\partial T}{\partial z} \text{ при } z = -h_{cons}, \quad (12)$$

где h_{cons} – толщина консолидированного слоя, зависящая от времени.

Выражение 12 отличается от уравнения известной классической термодинамической задачи Стефана о перемещении границы твердой фазы дополнительным множителем p . В соответствии с [16] решение уравнения 12 может быть представлено в виде:

$$h_{cons} = \alpha_0 \sqrt{t}, \quad \alpha_0 = \sqrt{\frac{\Delta T}{pB}}, \quad (13)$$

где

$$\Delta T = T_f - T_a, \quad B = \frac{\rho_i H}{2k_i}. \quad (14)$$

Таким образом, имеется решение задачи роста сплошного льда из пресной воды и из смеси льда и воды в нижней полуплоскости. Кристаллизация воды в ледяной каше с пористостью p будет приводить к образованию сплошного льда, толщина которого может быть вычислена в соответствии с формулой (13):

$$h_{cons} = \sqrt{\frac{2k_i}{p \cdot \rho_i H}} \cdot \sqrt{\Delta T \cdot t}, \quad (15)$$

где t – время экспозиции, выраженное в секундах. Если представить время экспозиции в сутках формула, то формула приобретает вид:

$$h_{cons} = 293.94 \cdot \sqrt{\frac{2k_i}{p \cdot \rho_i H}} \cdot \sqrt{\Delta T \cdot t_d}, \quad (16)$$

где t_d – время экспозиции в сутках при данной разности температур ΔT . Выражение под вторым знаком квадратного корня имеет традиционное понятие градусодней мороза.

1.3. Схема эволюции ледового канала и принятые допущения

Предлагаемая аналитическая модель построена на основе схемы формирования и эволюции ледового канала, поэтапно описанной ниже и представленной на рисунке 6.

1) При прокладывании судном канала в сплошном ровном льду образуется масса битого льда, которая попадает под днище судна и после его прохождения остается в канале. Часть обломков льда выносятся за пределы прокладываемого канала под его кромки (Рисунок 6а).

2) После прохождения судна масса ледяной крошки по кромкам канала частично сваливается обратно в канал, формируя торосистые гряды (брустверы) на нижней поверхности льда (Рисунок 6б).

3) Предполагается, что толщина ледяной каши в средней части канала выравнивается перед следующим проходом, а верхний слой консолидируется. Толщина консолидированного слоя вычисляется по описанной выше методике в зависимости от температурного режима воздуха, устанавливаемого между двумя соседними судопроходами. Рисунок 6с иллюстрирует схему канала перед следующим проходом судна.

4) Второй и последующие проходы судна отличаются от процесса, описанного в п.1, тем, что движение судна осуществляется не в сплошном ровном льду, а в двухслойной среде, представляющей собой ледяную крошку снизу и консолидированный слой льда сверху. Схематически

этот этап повторяет первый этап прокладки канала (Рисунок 6а).

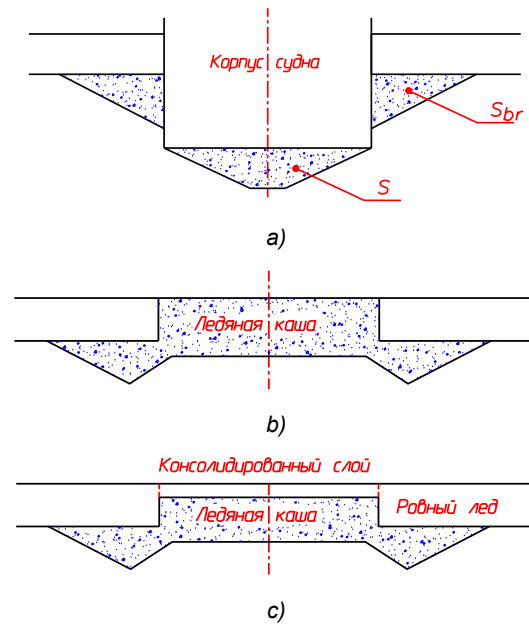


Рис. 6. Схема поэтапной эволюции судоходного канала во льду

При разработке аналитической модели использованы приведенные ниже допущения:

- 1) Ширина ледового канала равна ширине судна, проходящего по каналу
- 2) Толщина слоя льда в канале после первого прохода судна равна толщине окружающего льда
- 3) Проходы судна по каналу осуществляются через равные промежутки времени
- 4) Площадь сечения бруствера S_{br} вычисляется при следующих предположениях:

- бруствер формируется из льда, который сыпается из-под днища судна (Рисунок 6а);
- количество льда накапливается от прохода к проходу;
- часть отброшенного битого льда сваливается обратно в канал после прохождения судна.

1.4. Определение геометрических параметров сечения канала

В соответствии с изложенной схемой формирования ледового канала выполнены расчеты его геометрических параметров в зависимости от режима судопроходов и количества градусодней между последовательными проходами. Из рисунка 6а можно определить толщину слоя льда под судном h_{bi} при i -том проходе по каналу:

$$h_{bi} = (h_{ch_{i-1}} - h_{cons_i}) + h_{cons_i}(1 + \nu) = h_{ch_{i-1}} + h_{cons_i} \nu \quad (17)$$

где ν – коэффициент увеличения количества льда с учетом пористости ледяной крошки, равный

$$\nu = p/(1 - p), \quad (18)$$

где p – пористость.

Толщина льда в канале складывается из толщины ледяной каши и толщины консолидированного слоя. Перед первым прохождением судна в ровном льду толщина льда в канале и толщина консолидированного слоя равны толщине окружающего льда h_{ice} .

Таким образом, после i -го прохода судна толщину льда в канале можно определить по формуле:

$$h_{ch_i} = \frac{S_i}{W_{ch}} + 2 \cdot \beta \cdot \frac{S_{br_i}}{W_{ch}}, \quad (19)$$

где S_i – площадь тертого льда под кормой судна (заштрихованная зона на Рисунок 6а), определяемая как

$$S_i = h_{b_i} \cdot W_{ch} - h_{b_i}^2 / \tan \alpha; \quad (20)$$

S_{br_i} – площадь сечения брусстера по кромке канала;

β – коэффициент возврата льда в канал, определяющий количество льда, которое ссыпается обратно в канал после прохождения судна.

$$S_{br_i} = S_{br_{i-1}} \cdot (1 - \beta) + \frac{h_{b_i}^2 W_{ch}}{4} \quad (21)$$

Полученное значение толщины льда в канале после i -го прохода судна остается неизменным до следующего прохода судна или до тех пор, пока не произойдет промерзания ледяной каши по всей ее толщине. После этого начинается нарастание толщины ровного льда, которое можно оценить по существующим зависимостям. Такой сценарий возможен при крайне редкой эксплуатации канала.

2. Пример практического применения разработанной модели

2.1. Постановка задачи и исходные данные

На основе описанной аналитической модели эволюции ледового канала выполнены расчеты изменений геометрических параметров ледового канала в течение всего зимнего периода применительно к условиям северной части Обской губы. Предполагается, что судоходство осуществляется в припайном льду Обской губы. При этом полагается, что формирование канала начинается с момента перехода указанной температуры через ноль, а не с момента становления припая. Это обстоятельство приводит к некоторой консервативной оценке толщины льда в канале, не влияющей существенно на конечный результат

Информация по температурному режиму в рассматриваемом регионе получена по результатам измерений на гидрометеорологической станции (ГМС) Сеяха в зимний период 2022/2023 годов и на ГМС «Тадибэ-Яха» за 1977-1994 года (Таблица 1). График среднемесячных температур после перехода средней температуры через 0 приведен на Рисунке 11.

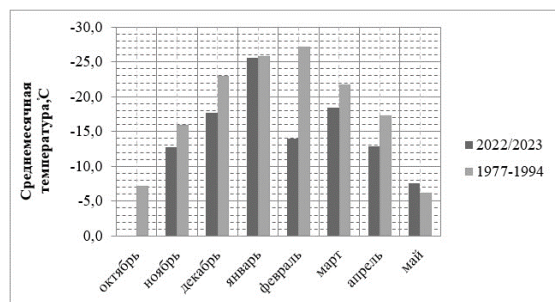


Рис. 7 – Изменение среднедекадной температуры в зимний период 1977-1994гг. и 2022/2023гг.

Для расчета толщины нарастающего ровного льда и консолидированного слоя в канале

использован описанный выше подход. В термодинамических расчетах при определении толщины ровного льда наличие снега на ледяном покрове не рассматривалось. Тем не менее, этот фактор учтен введением некоторого редуцирующего коэффициента, установленного по имеющимся данным фактических измерений толщины льда термического происхождения в рассматриваемом регионе. Наличие снега на поверхности льда в самом канале не учитывалось в связи с достаточно большой заданной частотой судопроходов по каналам.

Предполагается регулярное движение по каналу транспортного судна ледового плавания, основные размерения которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры судна

Длина судна по КВЛ	232 м
Ширина судна по КВЛ	34 м
Осадка	9 м

Ширина канала W_{ch} принята равной ширине судна по ватерлинии. Угол естественного скоса скоплений битого льда принят равным 25° , а пористость ледяной каши полагается равной 0,2.

Параметры воды и льда, принятые в расчетах, приведены в таблице 2. Рассмотрен случай пресной воды и пресноводного льда.

Таблица 2

Расчетные параметры воды и льда

Параметры	Обозначение	Ед. измер.	Значение
Плотность льда	ρ_l	кг/м ³	910
Теплопроводность льда	k_l	Вт/(м·°C)	2,24
Удельная теплота плавления льда	H	Дж/кг	33340
Пористость тертого льда в канале	P_0		0,2
Температура замерзания воды	T_f	°C	0
Плотность воды	ρ_w	кг/м ³	1000
Теплопроводность воды	k_w	Вт/(м·°C)	0,58
Теплоемкость воды	c_w	Дж/(м·°C)	4190

2.2. Результаты расчетов

Расчеты выполнены применительно к различной интенсивности прохождения судна по каналу. Рассмотрены следующие варианты: проход судна по каналу осуществляется один раз в 1 сутки, 3 суток, 5 суток и 10 суток.

На приведенных ниже рисунках представлена эволюция геометрических параметров ледовых каналов на протяжении всего зимнего периода (с октября по май) в виде изменения толщины окружающего ровного льда, толщины льда в канале (ледяной каши с консолидированным слоем) и толщины консолидированного слоя. Для сравнения представлены результаты расчетов по осредненным данным о среднемесячной температуре воздуха за период 1977-1994 гг. и сезона 2022/2023 годов.

Рисунок 8 позволяет проследить нарастание толщины окружающего ровного льда за пределами ледового канала при реализации двух упомянутых выше температурных режимов. Полученные максимальные значения толщин ровного льда,

характерные для мая, составляющие примерно 1,46 м для сезона 2022/2023 годов и 1.70 м по осредненным данным за период 1977-1994 гг., хорошо согласуются с данными натурных наблюдений.

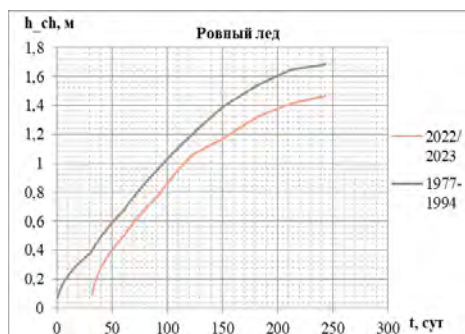


Рис. 8 – Сравнение изменения толщины окружающего ровного льда по температурным данным за 1977-1994 и 2022/2023 г.

Рисунок 9 позволяет оценить влияние частоты прохода судна по каналу на изменение толщины слоя льда в канале, состоящего из ледяной каши и консолидированного слоя. Рисунок 10 показывает, как влияет частота прохода судна на формирование консолидированного слоя: на графике приводятся максимальные толщины, до которых успевает нарасти консолидированный слой перед очередным проходом судна.

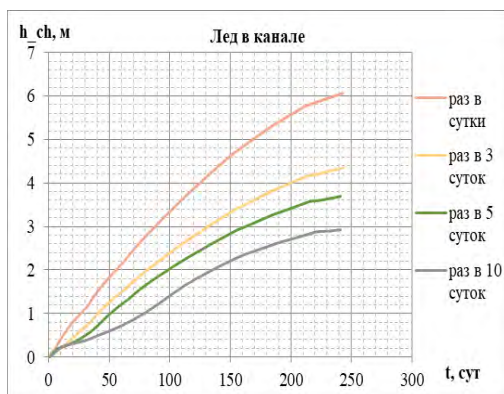


Рис. 9 – Изменение толщины льда в канале по температурным данным 1977-1994 гг

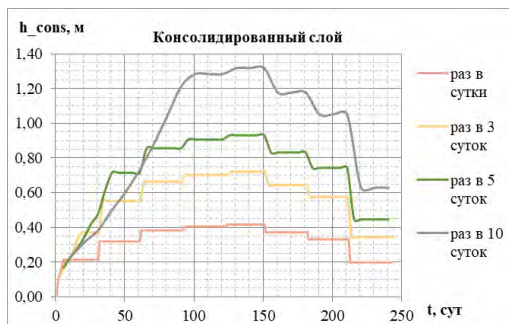


Рис.10 – Изменение толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 гг.

Рисунки 11 – 14 позволяют сопоставить динамику изменения толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 гг. и по данным 2022/2023 г. при различной частоте прохода судов.

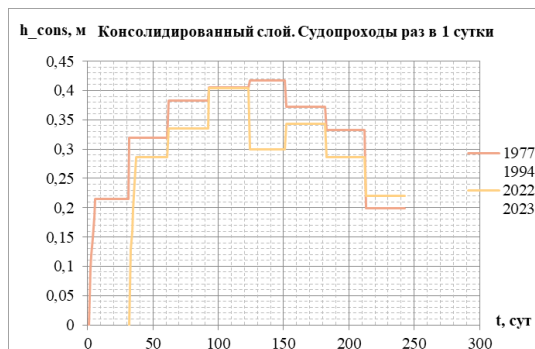


Рис. 11 – Изменение толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 и 2022/2023 г. с частотой прохода раз в 1 сутки



Рис. 12– Изменение толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохода раз в 3 суток

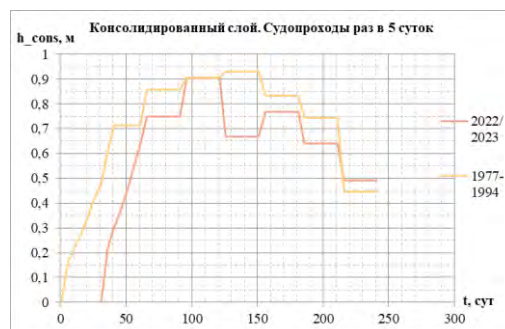


Рис. 13 –Изменение толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохода раз в 5 суток



Рис. 14 – Изменение толщины консолидированного слоя по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохода раз в 10 суток

На рисунках 15 – 18 приведены результаты расчетов изменения толщины льда в канале, состоящего из ледяной каши и консолидированного

слоя, в течение всего зимнего периода при различной частоте прохода судна. Приведены графики для двух температурных режимов: по усредненным температурным данным 1977–1994 гг. и 2022/2023 гг. В отличие от изменения толщины консолидированного слоя, который разрушается после каждого прохождения судна и начинает расти заново, толщина слоя льда в канале увеличивается монотонно вследствие накопления ледяной каши.

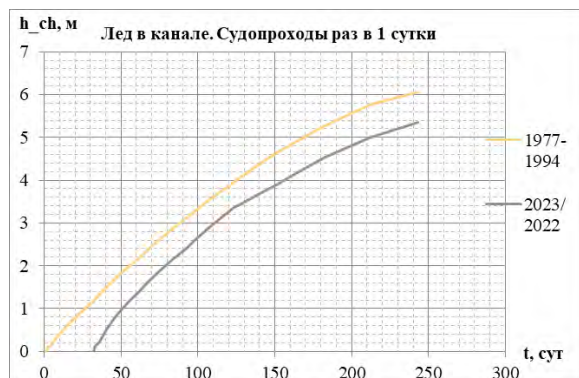


Рис. 15 – Изменение толщины льда в канале по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохождения раз в 1 сутки

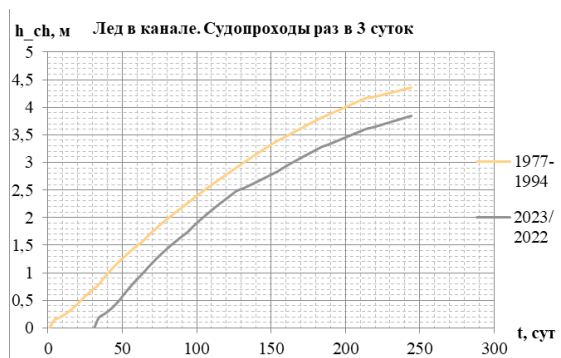


Рис. 16 – Изменение толщины льда в канале по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохождения раз в 3 суток

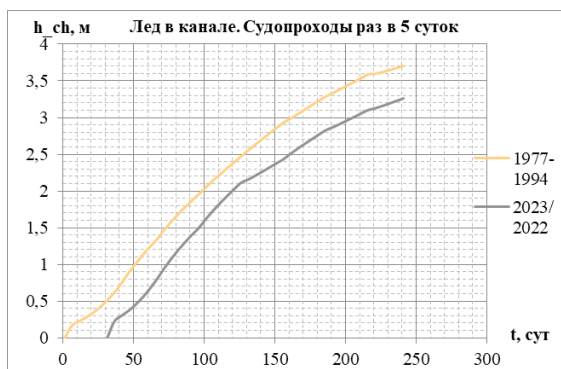


Рис. 17 – Изменение толщины льда в канале по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохождения раз в 5 суток

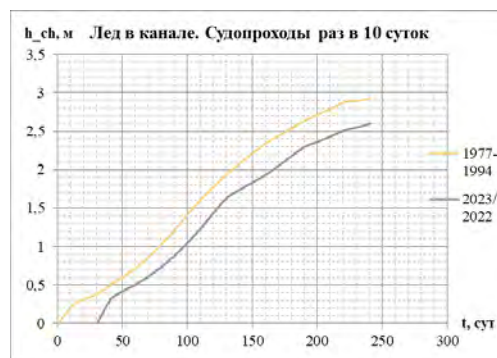


Рис. 18 – Изменение толщины льда в канале по температурным данным 1977-1994 гг. и 2022/2023 г. с частотой прохождения раз в 10 суток

2.3. Анализ результатов расчетов

Результаты расчетов показали, что по усредненным данным о среднемесячных температурах за период 1977-1994 гг. толщина ровного ледового периода достигает 1,70 м, в то время как при использовании данных о среднемесячных температурах зимнего сезона 2022/2023 эта величина составляет 1,46 м. Эти величины хорошо согласуются с результатами непосредственных измерений толщины льда в припае северной части Обской губы. Более тонкий лед в зимний сезон 2022/2023 гг. обусловлен сдвигом примерно на 1 месяц перехода среднемесячной температуры воздуха к отрицательным значениям и более мягкими зимними условиями в целом.

Толщина слоя льда в ледовом канале, состоящая из слоя ледяной каши и образовавшегося в верхней части консолидированного слоя, с использованием температурных данных 1977-1994 гг. достигает значений в диапазоне от 2,9 м при проходе судна по каналу 1 раз в 10 суток до 6,1 м – при проходе судна 1 раз в сутки. Соответствующие значения для сезона 2022/2023 гг. составляют 2,6 м и 5,3 м. Анализ результатов расчетов показывает, что интенсивность судоходства по ледовому каналу существенно влияет на накопление льда в нем, и снижение частоты проходов от одного раза в сутки до одного раза в 10 суток приводит к снижению максимальной толщины слоя льда в канале почти в два раза применительно к обоим сериям данных по температурному режиму. При этом толщина консолидированного слоя, который формируется перед очередным проходом судна, уменьшается с увеличением частоты проходов, поскольку сокращается время смерзания блоков льда. Наибольшей толщины консолидированный слой достигает при самых низких температурах воздуха примерно в середине зимнего сезона. При использовании температурных данных 2022/2023 гг. максимальная расчетная толщина консолидированного слоя может достигать 1,32 м при частоте прохода судна 1 раз в 10 суток. Аналогичное значение при использовании температурных данных сезона 2022/2023 гг. составляет 1,29 м.

Заключение

Выполненные исследования включают в себя рассмотрение реальных термодинамических процессов, сопровождающих формирование и эволюцию ледовых судоходных каналов при регулярном и достаточно частом их использовании. Особенностью настоящей работы явилось изучение закономерностей изменения пористости ледяной каши в канале в зависимости от разности средней температуры льда и температуры кристаллизации воды, приведены численные оценки степени снижения пористости при увеличении этой разности, что обусловлено замерзанием воды в порах.

Представленная схема эволюции судоходного канала отличается от разработанных ранее расчетных моделей судовых каналов попыткой

описания реальной геометрии ледового канала, т.е. учесть формирование ледяных торосистых гряд (брустверов) по кромкам канала.

С использованием описанного подхода выполнен расчет изменения геометрических характеристик ледового канала в суровых ледовых условиях Обской губы в зависимости от частоты проходов судов. Анализ результатов показал возможность практического применения предложенной аналитической модели для прогнозирования состояния ледового канала в зависимости от ожидаемого температурного режима и интенсивности прохождения судов по нему. Это, в свою очередь, позволяет выполнить оценки достижимой скорости движения судов по каналу и, в конечном итоге, решать логистические задачи при определении оптимальных маршрутов.

Литература

1. Ashton, G. Evaluation of ice management problems associated with operation of a mechanical ice cutter on the Mississippi River, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1974, Special Report 214.
2. Michel, B., and Berenger, D. Algorithm for accelerated growth of ice in a ship's track, Proc. of the 3rd International Symposium on Ice Problems (IAHR), 1975, Hanover, New Hampshire, USA
3. Vance, G.P. Clearing ice-clogged shipping channels, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980, CRREL Report 80-28.
4. Sandkvist, J. Conditions in Brash Ice Covered Channels with repeated Passages, Proc. Of the 6th Int. Conference on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC '81), 1981, Quebec, Canada, 244-252.
5. Hamza, H. (1985). Numerical predictions of ice build-up in ships tracks // Proc. of the 8th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC '85), 1985, 7-14 September, Narssarsuaq, Greenland. Hørsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute, 797-810.
6. Riska, K., Blouquin, R., Coche, E., Shumovskiy, S., and Boreysa, D. Modelling brash ice growth in ports, Proc. of the 22nd International Symposium on Ice (IAHR), 2014, Singapore, 322-329.
7. Ettema, R., and Huang, H.-P. Ice Formation in Frequently Transited Navigations Channels, U.S. Army Cold Regions Research and Eng. Laboratory, 1990, CRREL Special Report 90-403.
8. Stefan, J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere, Sitzungsberichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung 2, Mathematik, Astronomie, Physik, Meteorologie und Technik, 98, 1889, pp. 965-983.
9. Karulin, E., Karulina, M., Tarovik, O. Analytical Investigation of Navigable Channel Evolution in Severe Ice Conditions, Proc. of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, 2018, Japan, June 10–15, 2018-TPC-0361
10. Riska, K., Wilhelmson, M., Englund, K. & Leiviska, T. Performance of Merchant Vessels in the Baltic, Winter Navigation Research Board, 1997, Res. Rpt 52, 72 p.
11. Nortala-Hoikkanen, A. Development of brash ice channels navigated by ship, Proc. of the 15 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, 1999, POAC-99, Espoo, Finland.
12. Westerberg, V. (2013). Brash ice growth – full scale ice tests in the Gulf of Bothnia for the Port of Sabetta, 2013, Highlights 58/2013.
13. Богданов А., Иерусалимский А. Учет интенсивности нарастания льда в канале при моделировании движения судов в речном припае, Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества, 1990, Сборник научных трудов ЦНИИМФ, Москва, «Транспорт», стр. 145–152.
14. ВМО - Всемирная метеорологическая организация, No.259 • Издание 1970 - 2014
15. Соболев С.Л. Уравнения математической физики, Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", М., 1966. – 444 стр. с ил.
16. Марченко А.В. Моделирование консолидации и таяния торосов, Труды ЦНИИ им. А.Н. Крылова, 2007, Вопросы морской ледотехники; вып.34(318) – с.97-138.

References

1. Ashton, G. Evaluation of ice management problems associated with operation of a mechanical ice cutter on the Mississippi River, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1974, Special Report 214.
2. Michel, B., and Berenger, D. Algorithm for accelerated growth of ice in a ship's track, Proc. of the 3rd International Symposium on Ice Problems (IAHR), 1975, Hanover, New Hampshire, USA
3. Vance, G.P. Clearing ice-clogged shipping channels, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980, CRREL Report 80-28.
4. Sandkvist, J. Conditions in Brash Ice Covered Channels with repeated Passages, Proc. Of the 6th Int. Conference on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC '81), 1981, Quebec, Canada, 244-252.
5. Hamza, H. (1985). Numerical predictions of ice build-up in ships tracks // Proc. of the 8th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC '85), 1985, 7-14 September, Narssarsuaq, Greenland. Hørsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute, 797-810.

6. Riska, K., Blouquin, R., Coche, E., Shumovskiy, S., and Boreysha, D. Modelling brash ice growth in ports, Proc. of the 22nd International Symposium on Ice (IAHR), 2014, Singapore, 322-329.
7. Ettema, R., and Huang, H.-P. Ice Formation in Frequently Transited Navigations Channels, U.S. Army Cold Regions Research and Eng. Laboratory, 1990, CRREL Special Report 90-403.
8. Stefan, J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere, Sitzungsberichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung 2, Mathematik, Astronomie, Physik, Meteorologie und Technik, 98, 1889, pp. 965-983.
9. Karulin, E., Karulina, M., Tarovik, O. Analytical Investigation of Navigable Channel Evolution in Severe Ice Conditions, Proc. of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, 2018, Japan, June 10–15, 2018-TPC-0361
10. Riska, K., Wilhelmson, M., Englund, K. & Leiviska, T. Performance of Merchant Vessels in the Baltic, Winter Navigation Research Board, 1997, Res. Rpt 52, 72 p.
11. Nortala-Hoikkanen, A. Development of brash ice channels navigated by ship, Proc. of the 15 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, 1999, POAC-99, Espoo, Finland.
12. Westerberg, V. (2013). Brash ice growth – full scale ice tests in the Gulf of Bothnia for the Port of Sabetta, 2013, Highlights 58/2013.
13. Bogdanov, A, and Ierusalimsky, A (1990). "Accounting for the Intensity of Ice Growth in the Channel When Modeling the Vessels' Movement in the River Fast Ice," Trans CNIIF, 145–152.
14. WMO – World Meteorological Organization, No.259 • Publication 1970 - 2014
15. Sobolev S.L. Uravneniya matematicheskoi fiziki [Equations of mathematical physics], Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoi literatury izdatelstva "Nauka", M., 1966.- 444 str. s il.
16. Marchenko, A (2007). "Modeling Consolidation and Melting of Ice Hummocks," Trans Krylov State Res Center, 34(318), 97–138.

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

Карулин Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент по специальности, доцент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; ведущий научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: evgeny.b.k@gmail.com

Evgeny B. Karulin, Ph. D. (Eng.), Assistant Professor, Associate Professor of the Department of ship theory, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation; Leading Researcher, Krylov State Research Centre, 44 Moskovskoye shosse St Petersburg 196158, Russian Federation, e-mail: evgeny.b.k@gmail.com

Карулина Марина Марковна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: m_karulina@ksrc.ru

Marina M. Karulina, Ph. D. (Eng.), Leading Researcher, Krylov State Research Centre, 44 Moskovskoye shosse St Petersburg 196158, Russian Federation, e-mail: m_karulina@ksrc.ru

Жугина Екатерина Владимировна, студентка 1 курса магистратуры факультета Кораблестроения и океанотехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zhugina.katia@yandex.ru

Ekaterina V. Zhugina, 1st year master's student of the Faculty of Shipbuilding and Ocean Engineering, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: zhugina.katia@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.03.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.005>

Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях наклоненных шпангоутных контуров

Семенова В.Ю.¹ sem_viktoria@mail.ru, Никитин Н.В.^{1,2} morintex_sbp@mail.ru,Динцер А.И.^{1,3} cassraps19@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²НИЦ «МОРИНТЕХ»,
³Северное ПКБ

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных сил и моментов второго порядка для различных изолированных видов качки на основании применения двумерной потенциальной теории. Приводится сравнение результатов расчета нелинейных сил и моментов соответствующих видов качки при использовании классического и модифицированного методов интегральных уравнений для жидкости как неограниченной, так и ограниченной глубины. Результаты расчетов, полученные при использовании модифицированных методов, сопоставляются с результатами расчетов, полученных классическими методами. Показано удовлетворительное согласование результатов расчета между собой в большинстве случаев. Представлено исследование влияния угла наклона различных типов шпангоутных контуров на величину нелинейных сил и моментов второго порядка. Делается вывод о целесообразности дальнейшего использования модифицированного метода интегральных уравнений в условиях мелководья при определении нелинейных сил и моментов, действующих на наклоненные контура.

Ключевые слова: двумерная потенциальная теория, метод интегральных уравнений, функция Грина, нелинейные силы второго порядка, угол крена

Для цитирования: Семенова В.Ю., Никитин Н.В., Динцер А.И., Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях наклоненных шпангоутных контуров, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 48—56. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.005

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.005>

Calculation of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions

Viktoriya Yu. Semenova¹ sem_viktoria@mail.ru, Nikolai V. Nikitin^{1,2} morintex_sbp@mail.ru,Aleksandr I. Dintser^{1,3} cassraps19@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²Research centre «Marine Intellectual Technologies», Russian Federation, ³Severnoye DB, Russian Federation

Abstract. The article considers the calculation of second-order non-linear forces and moments for various isolated types of ship motions based on the application of two-dimensional potential theory. The calculation results of non-linear forces and moments are given for the corresponding types of ship motions using classical and modified methods of integral equations for fluid of both infinite depth and in shallow waters. The calculation results obtained using modified methods are compared with the calculation results obtained by classical methods. Most of the time, calculation yields a satisfying result. An investigation of the heel angle influence for the various types of frame sections on the values of second-order non-linear forces and moments is shown. The conclusion is made about the expediency of further use of the modified method of integral equations in shallow water conditions when determining nonlinear forces and moments acting on heeled contours.

Keywords: two-dimensional potential theory, method of integral equations, Green's function, nonlinear forces of the second order, heel angle

For citation: Viktoria Yu. Semenova, Nikolai V. Nikitin, Aleksandr I. Dintser, Calculation of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 48—56. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.005

Введение

Расчеты инерционно-демпфирующих сил первого порядка, а именно коэффициентов присоединенных масс и демпфирования для наклоненных шпангоутных сечений были выполнены в работе Элис Я.М. [8], [9]. В работе [7] рассмотрено определение постоянных нелинейных сил второго

порядка в зависимости от изменения угла крена для различных судов на основании применения гипотезы плоских сечений.

Для определения нелинейных сил, возникающих при качке шпангоутных контуров судна на регулярном волнении обычно используются два метода: модифицированный метод [1], [2], [10] и метод интегральных уравнений [3], [4], [11].

Однако использование комбинированного метода, основанного на конформном отображении контуров и методе гидродинамических особенностей для накренных шпангоутных контуров сопряжено с трудностями нахождения конформного отображения несимметричного шпангоутного контура.

Использование метода интегральных уравнений в классическом виде [3] приводит к необходимости применения интерполяции результатов из-за потери точности решения на «нерегулярных» частотах. Математически «нерегулярные» частоты объясняются тем, что определитель матрицы системы линейных интегральных уравнений для неизвестных интенсивностей источников стремится к нулю.

Учитывая упомянутые выше особенности, в настоящей работе рассматривается определение нелинейных сил, действующих на накренные шпангоутные контура при изолированных поперечных колебаниях на основании классического и модифицированного методов интегральных уравнений для расчета нелинейных сил в жидкости как бесконечной, так и ограниченной глубины, свободного от влияния нерегулярных частот, что подтверждается расчетами [6].

1. Описание метода расчета

Предположим, что на свободной поверхности тяжелой, однородной, идеальной, несжимаемой жидкости ограниченной глубины колеблется плоский контур, имеющий форму шпангоутного сечения [3].

В настоящей работе рассматриваются изолированные поперечно-горизонтальные (ПГК), вертикальные (ВК) и бортовые (БК) колебания. Поэтому для решения поставленной задачи вводятся три малых параметра, характеризующих соответственно относительные амплитуды ПГК, ВК, БК и представим кинематические характеристики колебаний контура в виде разложений в ряды по этим малым параметрам [1], [2]:

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

где b – полуширина шпангоутного контура.

Тогда потенциал скорости может быть представлен в виде следующей суперпозиции:

$$\begin{aligned} \Phi(\eta, \zeta, t) &= \Phi^{(1)}(\eta, \zeta, t) + \Phi^{(2)}(\eta, \zeta, t) = \\ &= \left(\sum_m \varepsilon_m \phi_m^{(1)}(\eta, \zeta) \right) e^{-i\omega t} + \\ &+ \left(\sum_{m,k} \varepsilon_m^2 \phi_{mm}^{(2)}(\eta, \zeta) \right) e^{-i2\omega t}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $m = 2, 3, 4$.

Здесь [2]:

$$\begin{aligned} \Phi^{(1)}(\eta, \zeta, t) &= (\varepsilon_2 \phi_2^{(1)} + \varepsilon_3 \phi_3^{(1)} + \varepsilon_4 \phi_4^{(1)}) \cdot e^{-i\omega t}, \\ \Phi^{(2)}(\eta, \zeta, t) &= (\varepsilon_2^2 \phi_{22}^{(2)} + \varepsilon_3^2 \phi_{33}^{(2)} + \varepsilon_4^2 \phi_{44}^{(2)}) \cdot e^{-i2\omega t}. \end{aligned} \quad (3)$$

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

$\phi_{22}^{(2)}, \phi_{33}^{(2)}, \phi_{44}^{(2)}$ – потенциалы, обусловленные изолированными ПГК, ВК и БК контура.

Линеаризованные граничные условия на свободной поверхности жидкости в задачах второго порядка для каждого потенциала скорости представляются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial \zeta} - 4v\phi_{mm}^{(2)} &= M_{mm}^{(2)} = \\ &= i \frac{\omega}{2g} \cdot \left\{ \left(2 \frac{\partial \phi_m^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + 3(v\phi_m^{(1)})^2 + \phi_m^{(1)} \frac{\partial^2 \phi_m^{(1)}}{\partial \eta^2} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Граничные условия непротекания имеют вид [3]:

$$\frac{\partial \phi_{22}^{(2)}}{\partial n} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 \phi_2^{(1)}}{\partial s \partial \zeta}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_{33}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{i}{2} \frac{\partial^2 \phi_3^{(1)}}{\partial s \partial \eta}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_{44}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial \phi_{44}^{(1)}}{\partial s} + y \frac{\partial^2 \phi_4^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + z \frac{\partial^2 \phi_4^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} \right\}. \quad (7)$$

Для определения потенциалов второго порядка в работе используются классический и модифицированный методы интегральных уравнений.

Согласно классическому методу [11], каждый потенциал $\phi_{mm}^{(2)}$ определяется на основании решения соответствующей системы интегральных уравнений с учетом граничного условия на свободной поверхности в правой части:

$$\begin{aligned} -\phi_{mm}^{(2)}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_S \{ \phi_{mm}^{(2)}(\eta_1, \zeta_1) \times \\ \times \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) \} ds = \left\{ \int_S F_{mm}^{(2)} \cdot G^{(2)} \right\} ds + \\ + \phi_{mm1}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где } \phi_{mm1} = \int_{-\infty}^{\infty} M_{mm}^{(2)}(\eta_1, 0) G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) d\eta_1. \quad (9)$$

Согласно модифицированному методу [6], в системе (8) потенциал второго порядка представляется в виде суперпозиции двух потенциалов:

$$\phi_{mm}^{(2)} = \phi_{mm1} + \phi_{mm2},$$

где потенциалы ϕ_{mm1} учитывают граничное условие на свободной поверхности, а

граничное условие на контуре для потенциала ϕ_{mm2} записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial \phi_{mm2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{mm1}}{\partial n}. \quad (11)$$

Здесь

$$\frac{\partial \phi_{mm1}}{\partial n} = \frac{\partial \psi_{mm1}}{\partial s}$$

где ψ_{mm1} – сопряженная с потенциалом функция тока.

$$\begin{aligned} -\phi_{mm2}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{mm2}(\eta_1, \zeta_1) \times \\ \times \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{mm2}}{\partial n} G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds; \end{aligned} \quad (12)$$

Система интегральных уравнений (8) решается относительно второго потенциала (ϕ_{mm2}) с учетом граничного условия на контуре (12). Для потенциала, учитывающего граничное условие на свободной поверхности используется выражение (9).

При использовании классического и модифицированного методов интегральных уравнений функция Грина второго порядка имеет вид:

- в условиях жидкости неограниченной глубины:

$$\begin{aligned} G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) = \\ = Re_j \left\{ \log \left(\frac{\zeta - \zeta^*}{\zeta - \bar{\zeta}^*} \right) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\zeta - \bar{\zeta})}}{4v - k} dk - j 2\pi e^{-i4v(\zeta - \bar{\zeta})} \right\} = (13) \\ = G_C^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) + j G_S^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1). \end{aligned}$$

где

$$\bar{\zeta} = \eta + j\zeta, \quad \zeta^* = \eta_1 + j\zeta_1, \quad \bar{\zeta}^* = \eta_1 - j\zeta_1.$$

- в условиях жидкости ограниченной глубины:

$$\begin{aligned} G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) = \\ = 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \times \\ \times \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \\ - 2\pi \sum_{k=1}^{\alpha} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 + 16v^2}{\mu_{4k}^2 h + 16v^2 h + 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta + h) \times \\ \times \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} - \\ - i 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \times \\ \times \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \cos \mu_{40}|\eta - \eta_1| = \\ = G_C^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) + i G_S^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1). \end{aligned} \quad (14)$$

где μ_{40} – положительный корень уравнения:

$4v = \mu_{40} \tanh(\mu_{40}h)$, а μ_{4k} – положительный корень уравнения: $-4v = \mu_{4k} \tan(\mu_{4k}h)$.

Для численного решения системы (8) применяется подход, предложенный В. Франком [12]. Контур представляется в виде последовательности соединенных между собой N линейных сегментов длиной s_j . Вследствие этого можно перейти к системе $2N$ связанных линейных алгебраических уравнений (13) где выполнена подстановка потенциала, учитывающего граничное условие на контуре в выражение (8) в комплексном виде $\phi_{mm2} = \phi_{mm2C} + i\phi_{mm2S}$

$$\begin{aligned} -2\pi\phi_{Cmm}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \phi_{Cmm}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) I_{ij}^{(mm)} - \sum_{j=1}^N \phi_{Smm}^{(2)} J_{ij}^{(mm)} = \\ = \sum_{j=1}^N F_{mmC}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) K_{ij}^{(mm)} - \sum_{j=1}^N F_{mmS}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) L_{ij}^{(mm)} + \\ + \phi_{mmC}(\eta_i, \zeta_i); \\ -2\pi\phi_{Smm}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \phi_{Cmm}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) J_{ij}^{(mm)} + \sum_{j=1}^N \phi_{Smm}^{(2)} I_{ij}^{(mm)} = (15) \\ = \sum_{j=1}^N F_{mmC}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) L_{ij}^{(mm)} + \sum_{j=1}^N F_{mmS}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) K_{ij}^{(mm)} + \\ + \phi_{mmS}(\eta_i, \zeta_i). \end{aligned}$$

где $i = 1, 2, \dots, N$.

Коэффициенты I_{ij} , J_{ij} , K_{ij} , L_{ij} определяются по следующим формулам:

- в условиях жидкости неограниченной глубины:

$$\begin{aligned} I_{ij}^{(mm)} = \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \times \\ \times Re \left\{ \log \left(\frac{\zeta - \zeta^*}{\zeta - \bar{\zeta}^*} \right) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\zeta_i - \bar{\zeta})}}{4v - k} dk \right\} ds \end{aligned} \quad (16)$$

$$J_{ij}^{(mm)} = -2\pi \left\{ \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] Re e^{-i4k(\zeta_i - \bar{\zeta})} \right\} ds; \quad (17)$$

$$K_{ij}^{(mm)} = \int_{s_j} Re \left\{ \log \left(\frac{\zeta - \zeta^*}{\zeta - \bar{\zeta}^*} \right) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\zeta_i - \bar{\zeta})}}{4v - k} dk \right\} ds; \quad (18)$$

$$L_{ij}^{(mm)} = -2\pi \int_{s_j} Re e^{-i4k(\zeta_i - \bar{\zeta})} ds. \quad (19)$$

- в условиях жидкости ограниченной глубины:

$$\begin{aligned} I_{ij} = \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \times \\ \times \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \times \right. \\ \times \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \\ - 2\pi \sum_{k=1}^{\alpha} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 + 16v^2}{\mu_{4k}^2 h + 16v^2 h + 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta + h) \times \\ \left. \times \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} \right\} ds; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} J_{ij} = - \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \times \\ \times \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) - \right. \\ \left. \times \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \cos \mu_{40}|\eta - \eta_1| \right\} ds; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} K_{ij} = F_m(\eta_j, \zeta_j) \int_{s_j} \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \times \right. \\ \times \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \\ - 2\pi \sum_{k=1}^{\alpha} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 + 16v^2}{\mu_{4k}^2 h + 16v^2 h - 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta + h) \times \\ \left. \times \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} \right\} ds; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_{ij} = F_m(\eta_j, \zeta_j) \int_{s_j} \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \times \right. \\ \left. \times \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \cos \mu_{40}|\eta - \eta_1| \right\} ds; \end{aligned} \quad (23)$$

где $m = 2, 3, 4$; h – глубина жидкости.

После определения потенциалов второго порядка можно перейти к определению гидродинамических сил и моментов, возникающих при каждом из этих трех видов колебаний контура.

Общие выражения для нелинейных гидродинамических сил и моментов второго порядка имеют вид [3]:

$$\begin{pmatrix} F_H^{(2)} \\ F_V^{(2)} \\ M^{(2)} \end{pmatrix} = A - B - C; \quad (24)$$

где:

$$A = - \int_{S_0} p^{(2)} \begin{pmatrix} \frac{d\eta}{dn} \\ \frac{d\zeta}{dn} \\ \left(\eta \frac{d\zeta}{dn} - \zeta \frac{d\eta}{dn} \right) \end{pmatrix} dS; \quad (25)$$

$$B = \int_{S_0} p^{(1)} \theta^{(1)} \begin{pmatrix} -\frac{d\zeta}{dn} \\ \frac{d\eta}{dn} \\ 0 \end{pmatrix} dS; \quad (26)$$

$$C = \int_{\Delta S} p^{(1)} \begin{pmatrix} \frac{d\eta}{dn} \\ \frac{d\zeta}{dn} \\ \left(\eta \frac{d\zeta}{dn} - \zeta \frac{d\eta}{dn} \right) \end{pmatrix} dS; \quad (27)$$

$$p^{(2)}(\eta, \zeta, t) = -\rho \left\{ -0,5g \zeta \theta^2(t) + \left(\eta_g(t) - \zeta \theta(t) \right) \times \right. \\ \times \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + \left(\zeta_g(t) + \eta \theta(t) \right) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + 0,5 \times \\ \times \left(\left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 \right) \Bigg\}; \quad (28)$$

Анализ результатов

Для расчета нелинейных горизонтальных (F_H), вертикальных (F_V) сил и моментов (M), возникающих

при поперечной качке шпангоутных контуров разработаны четыре программы, на основе: Классического метода интегральных уравнений для жидкости неограниченной глубины (КГ);

Модифицированного метода интегральных уравнений для жидкости неограниченной глубины (МГ);

Классического метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины при $h/T=10$ (КМ);

Модифицированного метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины при $h/T=10$ (ММ).

Расчеты нелинейных гидродинамических сил и моментов производились для шпангоутных контуров при углах крена θ от 10° до 40° с шагом $\Delta\theta = 10^\circ$.

Характеристики шпангоутных контуров приведены в таблице 1.

Система координат колеблющегося контура представлена на рисунке 1, где пунктирной линией выделено граничное условие при колебаниях контура в условиях жидкости ограниченной глубины:

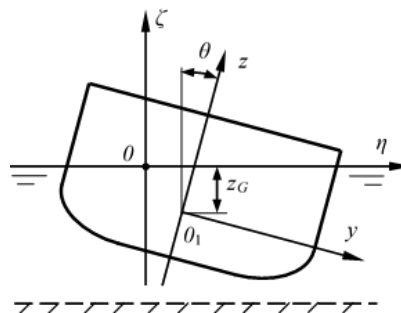


Рис. 1. Схема системы координат в задаче о колебаниях плоского контура.

Таблица 1

Таблица основных характеристик шпангоутных контуров

N/N	Тип контура (эскиз)	B, м	T, м	δ	S, м ²
1.		18	9,5	0,36	61,3
2.		4,5	3,5	0,51	8,1
3.		16,4	7	0,41	4,7
4.		4,8	2	0,95	9,6
5.		21	3	0,72	45,2

На рисунках 2 – 4 приведены наиболее показательные результаты расчетов нелинейных гидродинамических сил и моментов второго порядка четырьмя указанными выше методами.

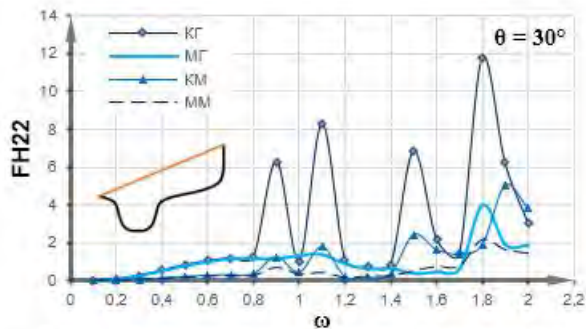


Рис. 2.а Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях контура 3.

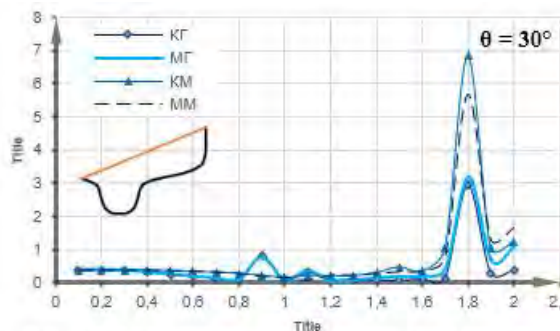


Рис. 2.б Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при вертикальных колебаниях контура 3.

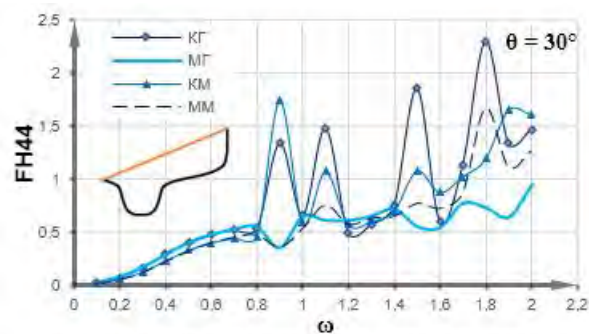


Рис. 2.в Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при бортовых колебаниях контура 3.

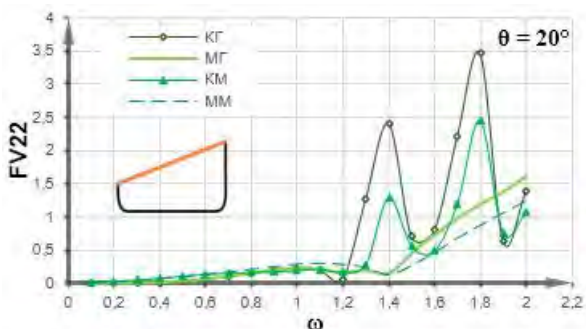


Рис. 3.а Вертикальные силы второго порядка, возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях контура 4.

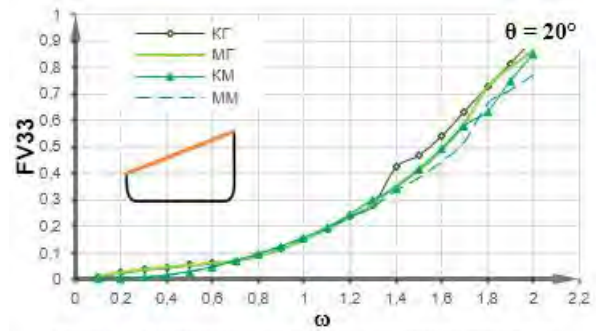


Рис. 3.б Вертикальные силы второго порядка, возникающие при вертикальных колебаниях контура 4.

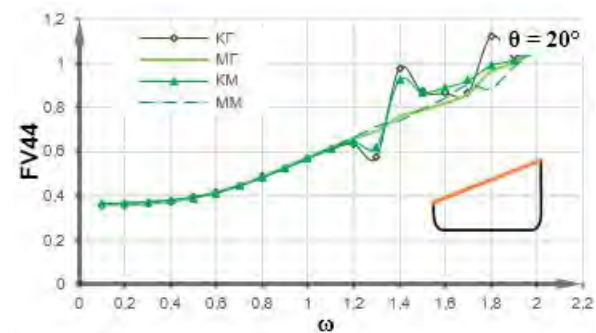


Рис. 3.в Вертикальные силы второго порядка, возникающие при бортовых колебаниях контура 4.

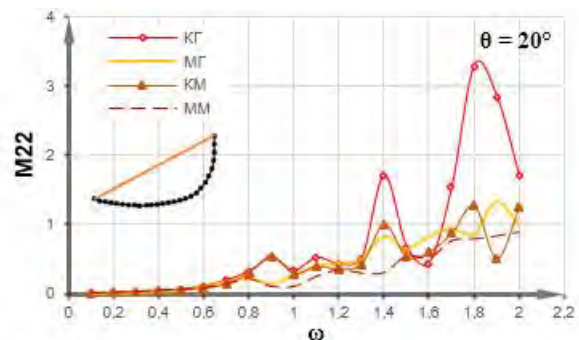


Рис. 4.а Моменты второго порядка, возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях контура 1

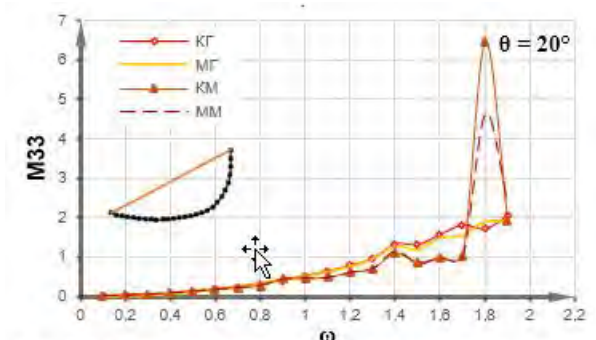


Рис. 4.б Моменты второго порядка возникающие при вертикальных колебаниях контура 1.

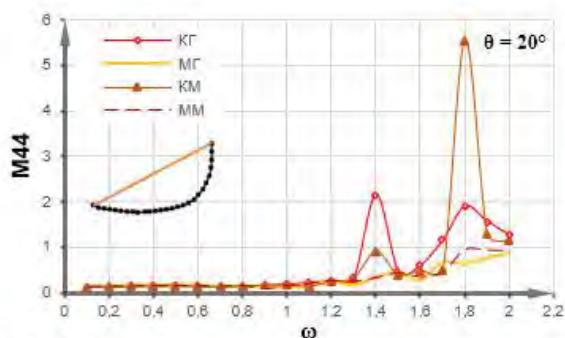


Рис. 4.6 Моменты второго порядка возникающие при бортовых колебаниях контура 1.

Из представленных графиков видно, что результаты расчетов нелинейных сил и моментов, полученных на основании применения классического метода интегральных уравнений для бесконечно-глубокой жидкости (КГ) и жидкости ограниченной глубины (КМ при $h/T = 10$) как и результаты, полученные на основании применения модифицированного метода для тех же случаев (МГ и ММ соответственно) практически совпадают между собой. Особенно хорошее согласование результатов по четырем методам наблюдается для нелинейных вертикальных сил (рис.3 а, б, в).

Для зависимостей нелинейных горизонтальных, вертикальных сил второго порядка и моментов, полученных на основании применения классических методов интегральных уравнений (КГ и КМ) характерно влияние «нерегулярных» частот, которое проявляется в резком увеличении значений данных сил и требует дальнейшей аппроксимации результатов. Применение модифицированных методов (МГ и ММ) позволяет в большинстве случаев избежать негативное влияние «нерегулярных» частот (рис.2, 3, 4)

На рисунках 5, 6, 7 приведены наиболее показательные результаты расчетов нелинейных гидродинамических сил и моментов второго порядка, полученные модифицированным методом интегральных уравнений в жидкости неограниченной глубины.

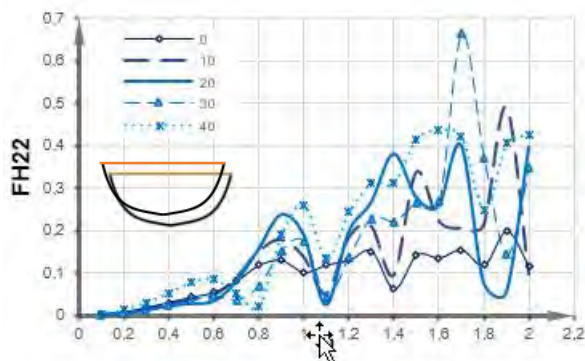


Рис. 5.5 Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях контура 5

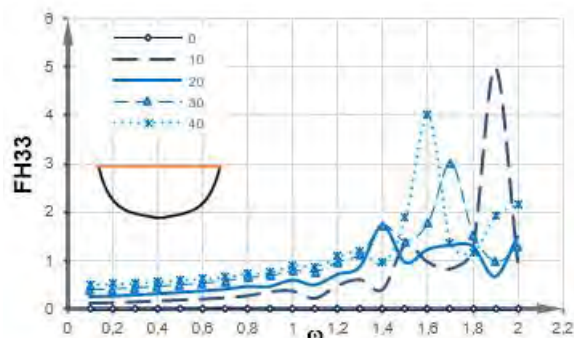


Рис. 5.6 Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при вертикальных колебаниях контура 5.

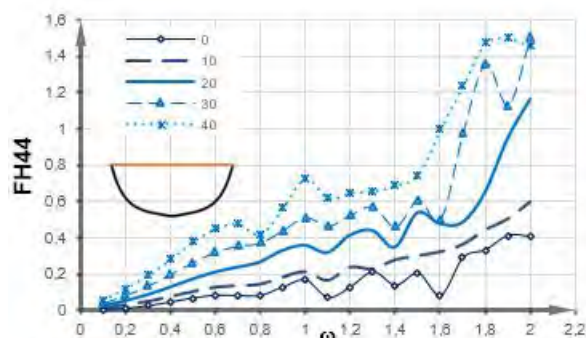


Рис. 5.6 Горизонтальные силы второго порядка, возникающие при бортовых колебаниях контура 5.

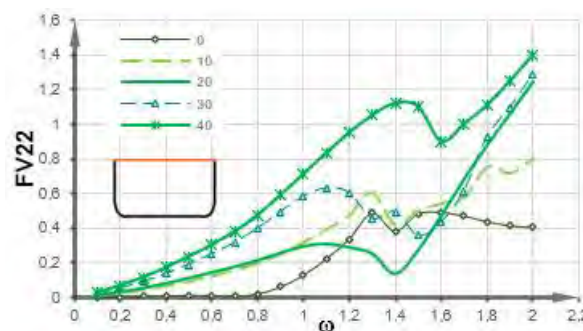


Рис. 6.6 Вертикальные силы второго порядка, возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях для контура 4.

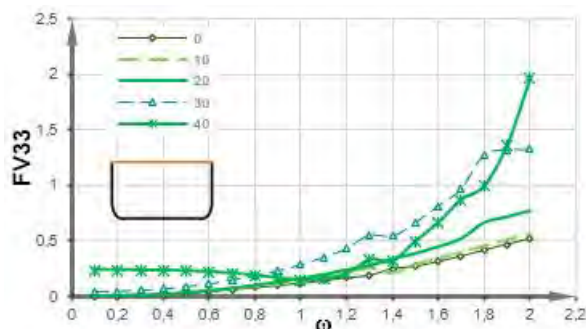


Рис. 6.6 Вертикальные силы второго порядка, возникающие при вертикальных колебаниях для контура 4.

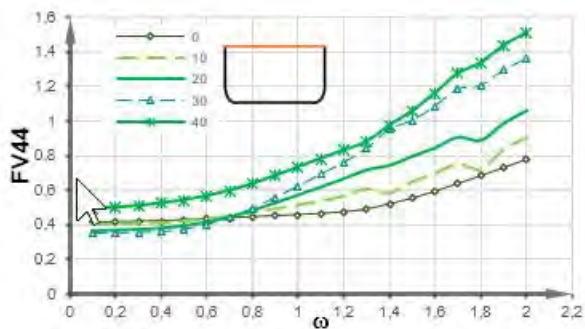


Рис. 6.в Вертикальные силы второго порядка, возникающие при бортовых колебаниях контура 4.

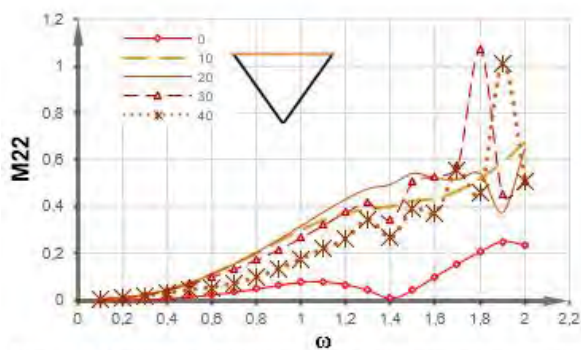


Рис. 7.а Моменты второго порядка возникающие при поперечно-горизонтальных колебаниях контура 2.

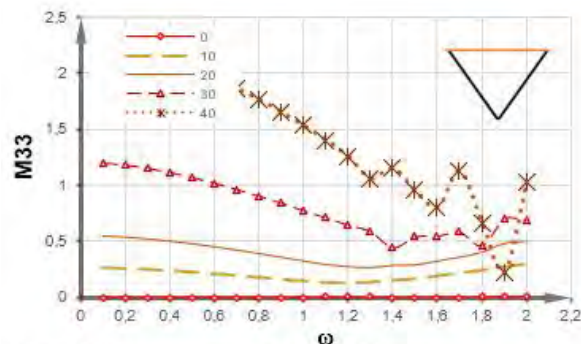


Рис. 7.б Моменты второго порядка возникающие при вертикальных колебаниях контура 2.

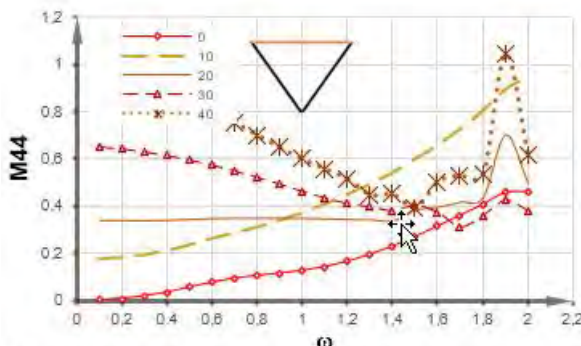


Рис. 7.в Моменты второго порядка возникающие при бортовых колебаниях контура 2.

Из всех представленных результатов видно, что нелинейные силы и моменты, возникающие при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях в большинстве случаев увеличиваются при увеличении угла крена. Так, безразмерная горизонтальная сила FH_{44} , возникающая при бортовых колебаниях эллиптического контура на частоте $\omega = 1,2$ при угле крена 40 градусов в 8 раз больше соответствующей силы при нулевом значении угла крена (рис.5 в). Вертикальная сила FV_{22} , возникающая при поперечно-горизонтальных колебаниях прямоугольного контура при угле крена 40 градусов также больше соответствующих сил при меньших значениях угла крена.

Зависимости изменения нелинейных моментов M_{22} , M_{33} , M_{44} приведены для треугольного шпангоутного контура на рис 7 а, б, в. Из-за резкого изменения формы подводной части данного шпангоутного контура при увеличении угла крена наблюдается многократное увеличение значений моментов, особенно возникающих при вертикальных и бортовых колебаниях. Так, момент M_{44} при угле крена 40 градусов и частоте $\omega = 0,8$ в 7 раз больше соответствующего момента при нулевом крене (рис.7 в). Нелинейный момент M_{33} , возникающий при вертикальных колебаниях при угле крена 40 градусов и той же частоте в 10 раз больше вертикального момента M_{33} при угле крена 10 градусов.

Следует отметить, что нелинейные горизонтальные сила и момент FH_{33} и M_{33} возникают только при наличии угла крена и обусловлены асимметрией шпангоутного контура относительно вертикальной оси. При нулевом угле крена данные силы и моменты отсутствуют (рис. 5 б, 7 б)

Заключение

На основе произведенных расчетов получены следующие результаты:

- Применение модифицированного метода интегральных уравнений для расчета нелинейных сил и моментов второго порядка позволяет избежать отрицательного влияния нерегулярных частот на значения данных величин, характерных для классического метода интегральных уравнений, особенно в жидкости ограниченной глубины.

В дальнейшем изложенный метод может быть применен для расчета других категорий нелинейных сил, действующих на накренные контура.

- Влияние изменения угла накрена шпангоута на величины нелинейных сил и моментов второго порядка в значительной степени зависит от изменения геометрии смоченной поверхности.

- Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при расчете нелинейных сил и моментов второго порядка, действующих на накренное судно.

Литература

1. Семенова В.Ю.(1999) Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. Библиотека СПбГМТУ.
2. Семенова В.Ю.(2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. Библиотека СПбГМТУ.
3. Со Чжо Ту(2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье. Дисс. на соискание уч. степени к.т.н. Б-ка СПбГМТУ.
4. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю.(2012) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке контура на тихой воде в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии, № 2(16), с.22-26.
5. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю.(2013) Расчет нелинейной поперечной качки судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, № 2(20), с.28-33.
6. Семенова В.Ю., Голуб В.А.(2017) Использование модифицированного метода интегральных уравнений для определения нелинейных сил, возникающих при качке судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии. № 4 Часть 2, С. 46-55.
7. Семенова В.Ю., Баканов И.К., Голуб В.А.(2019) Определение возмущающих сил и сил волнового дрейфа, возникающих при поперечной качке наклоненного судна. Морские интеллектуальные технологии. № 3-2 (45), С. 31-38.
8. Элис Я.М.(1980). Присоединенные массы и демпфирование поперечных сечений наклоненного судна. Труды КТИРПИХ. Вып. 90.
9. Элис Я.М.(1980) Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном. Труды КТИРПИХ, Калининград, вып.89.
10. Lee C.M.(1968) The second-order theory of heaving cylinders in a free surface. Journal of ship research v.12, p.313-327.
11. Potash R.L.(1971) Second-order theory on oscillating cylinders. Journal of ship research.,v.15,N.4.
12. Frank, W.F.(1967) Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids. NSRDC, rep.2375.

References

1. Semenova V.Yu.(1999) Issledovanie i razrabotka programm rascheta nelineynykh gidrodinamicheskikh sil, voznikayushchikh pri kolebaniyakh konturov korabel'noy formy na svobodnoy poverkhnosti zhidkosti [Research and development of programs for calculating nonlinear hydrodynamic forces arises for oscillating ship's frame sections on the free surface of a liquid]. Dissertatsiya na soiskanie uch. stepeni k.t.n. Biblioteka SPbGMTU.
2. Semenova V.Yu.(2005) Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov [Development of a method for calculating nonlinear motions of ships]. Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. Biblioteka SPbGMTU.
3. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]. Diss. na soiskanie uch. stepeni k.t.n. B-ka SPbGMTU.
4. So Chzho Tu, Semenova V.Yu.(2012) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri poperechnoy kachke kontura na tikhoy vode v usloviyakh melkovod'ya [Determination of nonlinear second-order forces arising during lateral motions of the contour in calm water in shallow water conditions]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, No. 2(16), s.22-26.
5. So Chzho Tu, Semenova V.Yu.(2013) Raschet nelineynoy poperechnoy kachki sudna na melkovod'e [Calculation of nonlinear lateral motions of a vessel in shallow water]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, No. 2(20), s.28-33.
6. Semenova V.Yu. Golub V.A.(2017) Ispolzovanie modifitsirovannogo metoda integral'nykh uravneniy dlya opredeleniya nelineynykh sil, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e [Application of the modified method of integral equations for determination of the non-linear forces resulting from motions of a ship in shallow water]. Marine intellectual technologies. 2017. No. 4 Part 2, P. 46-55.
7. Semenova V.Yu., Bakanov I.K, Golub V.A.(2019) Opredelenie vozmushchayushchikh sil i sil volnovogo dreyfa, voznikayushchikh pri poperechnoy kachke nakrenennogo sudna [Determination of disturbing and wave drift forces arising at lateral motions of listed ship]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, No. 3-2 (45), P. 31-38.
8. Elis Ya.M.(1980). Prisoedinennye massy i dempfirovanie poperechnykh secheniy nakrenennogo sudna. [Added mass and damping of heeled ship cross-sections]. Trudy KTIR-PIKh. Vyp. 90.
9. Elis Ya.M.(1978). Gidrodinamicheskie davleniya, prisoedinennye massy i koeffitsienty dempfirovaniya priprodol'noy kachke sudna s krenom [Hydrodynamic pressures, added masses and damping coefficients during longitudinal ship motions with list]. Trudy KTIRPKh, Kaliningrad, vyp.54.
10. Lee C.M.(1968) The second-order theory of heaving cylinders in a free surface. Journal of ship research v.12, p.313-327.
11. Potash R.L.(1971) Second-order theory on oscillating cylinders. Journal of ship research.,v.15,N.4.
12. Frank, W.F.(1967) Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids. NSRDC, rep.2375.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Никитин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: morintex_sbp@mail.ru

Nikolai V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: morintex_sbp@mail.ru

Динцер Александр Ильич, инженер-конструктор 3 кат, Северное ПКБ, 198096, Россия, Санкт-Петербург, Корабельная ул. д. 6, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: cassraps19@gmail.com

Aleksandr I. Dintser, design engineer of the 3rd category, Severnoye DB, Korabelnaya 6, Saint-Petersburg, 198096, PhD student, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: cassraps19@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 21.04.2024

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.006>

Определение амплитуд качки и ускорений на нерегулярном волнении с учетом нелинейных сил

Альбаев Д.А.¹ albaevdanil@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение амплитуд различных видов качки и составляющих ускорения с учетом влияния нелинейных сил второго порядка на нерегулярном волнении в условиях бесконечно-глубокой жидкости и на мелководье. Для расчета амплитуд используется спектральный метод линеаризация нелинейных амплитуд качки и ускорений, полученных при выполнении расчетов на регулярном волнении. Приведены расчеты максимальных амплитуд различных видов качки и продольно-горизонтальных, поперечно-горизонтальных и вертикальных ускорений в различных точках судов при качке на различных курсовых углах. Выполнено сравнение расчетов по линейной и нелинейной теориям. Показано значительное влияние нелинейных сил на амплитуды качки и все составляющие ускорения. Данное влияние имеет место при увеличении балльности волнения. Проведено исследование влияния изменения относительной глубины на амплитуды и составляющие ускорения в условиях нерегулярного волнения. Показано значительное увеличение данных величин при уменьшении относительной глубины. Показано наибольшее влияние нелинейных сил второго порядка на вызываемые ими амплитуды качки и составляющие ускорения при качке судна лагом к волнению.

Ключевые слова: ускорения, качка судна, нелинейная качка, мелководье, нерегулярное волнение.

Для цитирования: Альбаев Д.А., Определение амплитуд качки и ускорений на нерегулярном волнении с учетом нелинейных сил, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 57—62. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.006

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.006>

Determination of amplitudes of motions and accelerations of ship on an irregular wave taking into account nonlinear forces

Danil A. Al'baev¹ albaevdanil@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paper deals with the determination of amplitudes of various types of motion and acceleration components taking into account the influence of nonlinear forces of the second order on an irregular wave in an infinitely deep water and in shallow water. The spectral method and linearization of nonlinear amplitudes of motion and acceleration obtained during calculations on regular waves are used to calculate amplitudes. Calculations of maximum amplitudes of various types of motion and longitudinal-horizontal, transverse-horizontal and vertical accelerations at various points of ships during motions at various course angles are given. Comparison of calculations by linear and nonlinear theories is performed. A significant influence of nonlinear forces on the amplitudes of motion and all components of acceleration is shown. This influence takes place at increasing of the wave grade. A study of the effect of changes in relative depth on amplitudes and acceleration components in irregular waves conditions has been carried out. A significant increase of these values with decreasing relative depth is shown. The greatest influence of nonlinear forces of the second order on the amplitudes of motions and acceleration components caused by them is shown in beam waves.

Keywords: accelerations, ship motions, nonlinear motions, shallow water, irregular waves.

For citation: Danil A. Al'baev, Determination of amplitudes of motions and accelerations of ship on an irregular wave taking into account nonlinear forces. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 57—62. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.006

Введение

В работах [1], [2], [7], [9] были определены амплитуды качки и ускорений с учетом нелинейных сил в условиях регулярного волнения. Между тем, одной из важнейших задач является определение амплитуд качки и ускорений в условиях нерегулярного волнения. Расчет амплитуд качки и ускорений с учетом нелинейных сил на нерегулярном волнении был выполнен в работе Со Чжо Ту [7]. При этом нелинейные силы определялись на основании двумерной теории. В работе показано увеличение

влияния нелинейных сил при увеличении балльности волнения и уменьшении относительной глубины. Особенно значительным влияние нелинейных сил проявляется при расчете ускорений.

В настоящей работе рассматривается методика определения амплитуд качки и ускорений с учетом нелинейных на нерегулярном волнении в бесконечно-глубокой жидкости и на мелководье. При этом нелинейные силы определяются на основании трехмерной теории [1], [2], [7], [9].

Описание метода

Суммарные амплитудно-частотные характеристики отдельных видов качки на основании теории нелинейных колебаний определяются с учетом малых параметров следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\xi_g^*}{a_w} &= \frac{\xi_g^{(1)}}{a_w} + \varepsilon_1 \frac{\xi_g^{(2)}}{a_w}; \quad \frac{\eta_g^*}{a_w} = \frac{\eta_g^{(1)}}{a_w} + \varepsilon_2 \frac{\eta_g^{(2)}}{a_w}; \\ \frac{\zeta_g^*}{a_w} &= \frac{\zeta_g^{(1)}}{a_w} + \varepsilon_3 \frac{\zeta_g^{(2)}}{a_w}; \quad \frac{\theta^*}{\alpha_0} = \frac{\theta^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_4 \frac{\theta^{(2)}}{\alpha_0}; \\ \frac{\psi^*}{\alpha_0} &= \frac{\psi^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_5 \frac{\psi^{(2)}}{\alpha_0}; \quad \frac{\chi^*}{\alpha_0} = \frac{\chi^{(1)}}{\alpha_0} + \varepsilon_6 \frac{\chi^{(2)}}{\alpha_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

Где a_w – амплитуда волны, α_0 – угол волнового склона.

Из формул (1) видно, что амплитудно-частотные характеристики, представляют собой линеаризованные величины, к которым может быть применен спектральный метод [11].

Тогда, для продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной и вертикальной качки расчет производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned} S_{\xi}(\omega) &= \left| \frac{\xi_g^*}{a_w} \right|^2 S_{\xi w}(\omega); \quad S_{\eta}(\omega) = \left| \frac{\eta_g^*}{a_w} \right|^2 S_{\eta w}(\omega); \\ S_{\zeta}(\omega) &= \left| \frac{\zeta_g^*}{a_w} \right|^2 S_{\zeta w}(\omega). \end{aligned} \quad (2)$$

А для бортовой, килевой и рысканья:

$$\begin{aligned} S_{\theta}(\omega) &= \left| \frac{\theta^*}{\alpha_0} \right|^2 S_{\alpha}(\omega); \quad S_{\psi}(\omega) = \left| \frac{\psi^*}{\alpha_0} \right|^2 S_{\alpha}(\omega), \\ S_{\chi}(\omega) &= \left| \frac{\chi^*}{\alpha_0} \right|^2 S_{\alpha}(\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве спектра ординат волнения $S_{\xi w}(\omega)$ для бесконечно-глубокой жидкости используется спектр Вознесенского-Нецветова, а для жидкости ограниченной глубины – спектр ТМА [12]. При этом спектр Вознесенского-Нецветова [5]:

$$\begin{aligned} S_{\xi w}(\omega, \infty) &= \\ &= \frac{9.43}{\bar{\omega}} 0.0358 h_{3\%}^2 \left(\frac{0.777 \bar{\omega}}{\omega} \right)^6 e^{-1.5 \left(\frac{0.777 \bar{\omega}}{\omega} \right)^4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Спектр ТМА [12]:

$$S_{\xi w}(\omega, h) = \Phi(\omega, h) \cdot S_{\xi w}(\omega, \infty), \quad (5)$$

где $\Phi(\omega, h)$ – корреляционная функция Китайгородского, учитывающая влияния мелководья [5]:

$$\Phi(\omega, h) = \tanh^2(\mu_0 h) \left(1 + \frac{2\mu_0 h}{\sinh(2\mu_0 h)} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Спектр уклонов волнения:

$$\begin{aligned} \frac{\ddot{\xi}_{mA}^*}{a_w} &= \frac{\ddot{\xi}_{mA}^{(1)}}{a_w} + \frac{\ddot{\xi}_{mA}^{(2)}}{a_w}; \quad \frac{\ddot{\eta}_{mA}^*}{a_w} = \frac{\ddot{\eta}_{mA}^{(1)}}{a_w} + \frac{\ddot{\eta}_{mA}^{(2)}}{a_w}; \\ \frac{\ddot{\zeta}_{mA}^*}{a_w} &= \frac{\ddot{\zeta}_{mA}^{(1)}}{a_w} + \frac{\ddot{\zeta}_{mA}^{(2)}}{a_w}. \end{aligned} \quad (7)$$

Псевдоспектры ускорений вычисляются с помощью выражений [4]:

$$\begin{aligned} S_{\ddot{\xi}_A}(\omega) &= \left| \frac{\ddot{\xi}_{mA}^*}{a_w} \right|^2 S_{\xi w}(\omega); \\ S_{\ddot{\eta}_A}(\omega) &= \left| \frac{\ddot{\eta}_{mA}^*}{a_w} \right|^2 S_{\eta w}(\omega); \end{aligned} \quad (8)$$

$$S_{\ddot{\zeta}_A}(\omega) = \left| \frac{\ddot{\zeta}_{mA}^*}{a_w} \right|^2 S_{\zeta w}(\omega).$$

Дисперсии перемещений и ускорений определяются интегрированием соответствующих спектральных плотностей [5]:

$$\begin{aligned} D_{\xi} &= \int_0^{\infty} S_{\xi}(\omega) d\omega; \quad D_{\eta} = \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega; \\ D_{\zeta} &= \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega) d\omega; \quad D_{\theta} = \int_0^{\infty} S_{\theta}(\omega) d\omega; \\ D_{\psi} &= \int_0^{\infty} S_{\psi}(\omega) d\omega; \quad D_{\chi} = \int_0^{\infty} S_{\chi}(\omega) d\omega; \\ D_{\ddot{\xi}_A} &= \int_0^{\infty} S_{\ddot{\xi}_A}(\omega) d\omega; \quad D_{\ddot{\eta}_A} = \int_0^{\infty} S_{\ddot{\eta}_A}(\omega) d\omega; \\ D_{\ddot{\zeta}_A} &= \int_0^{\infty} S_{\ddot{\zeta}_A}(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (9)$$

Зная дисперсии и используя закон распределения Рэлея, можно вычислить максимальные амплитуды и ускорения с учетом нелинейных факторов [12]

$$\begin{aligned} \xi_{gmax} &= 3.25 \sqrt{D_{\xi}}; \quad \eta_{gmax} = 3.25 \sqrt{D_{\eta}}; \\ \zeta_{gmax} &= 3.25 \sqrt{D_{\zeta}}; \quad \theta_{max} = 3.25 \sqrt{D_{\theta}}; \\ \psi_{max} &= 3.25 \sqrt{D_{\psi}}; \quad \chi_{gmax} = 3.25 \sqrt{D_{\chi}}; \\ a_{\xi max} &= 3.25 \sqrt{D_{\ddot{\xi}_A}}; \quad a_{\eta max} = 3.25 \sqrt{D_{\ddot{\eta}_A}}; \\ a_{\zeta max} &= 3.25 \sqrt{D_{\ddot{\zeta}_A}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Входящие в выражения (1) и (7) амплитуды качки и ускорений определялись на основании метода, изложенного в работах [1], [2], [7], [9].

Анализ результатов

Балльность волнения задавалась от 4 до 8 баллов. Расчеты ускорений проводились для различных типов судов: сухогруз “Новгород” ($L = 138$ м, $B = 20,6$ м, $T = 9$ м, $\delta = 0,68$, $\alpha = 0,78$, $h_0 = 1,0$ м), Танкер “Баскунчак” ($L = 74$ м, $B = 12$ м, $T = 4,65$ м, $\delta = 0,71$, $\alpha = 0,8$, $h_0 = 1,06$ м), лесовоз “Николай Новиков” ($L = 140$ м, $B = 21$ м, $T = 8,68$ м, $\delta = 0,74$, $\alpha = 0,83$, $h_0 = 2,31$ м) и различных относительных глубин.

На рисунках 1 – 3 представлены характерные результаты расчетов максимальных амплитуд нелинейной поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки танкера “Баскунчак” при курсовом угле $\beta = 90$ в сравнении с результатами расчетов максимальных амплитуд по линейной теории.

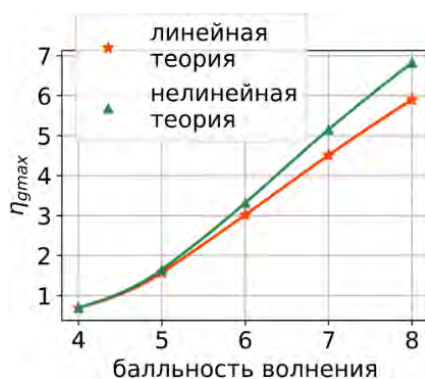


Рис. 1. η_{gmax} для танкера "Баскунчак" ($H/T = \infty$)

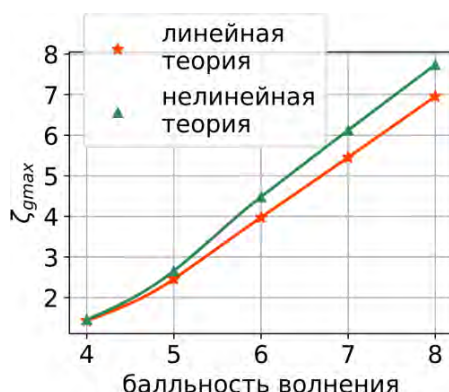


Рис. 2. ζ_{gmax} для танкера "Баскунчак" ($H/T = \infty$)

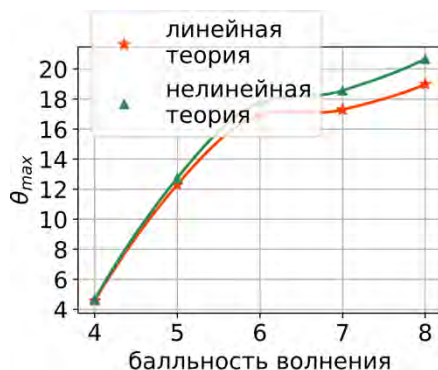


Рис. 3. θ_{max} для танкера "Баскунчак" ($H/T = \infty$)

Проведенный анализ полученных результатов для различных типов судов показал, что наибольшее влияние нелинейных сил второго порядка имеет место при расположении судна лагом на волнении 7, 8 баллов. Так, для танкера "Баскунчак" амплитуды нелинейной поперечно-горизонтальной качки на волнении 8 баллов на 10% процентов больше соответствующих линейных амплитуд (рис. 1). То же самое имеет место и для вертикальной качки (рис. 2).

Влияние нелинейных факторов на волнении высокой балльности объясняется наложением максимумов спектров на максимумы супергармонических резонансных режимов, имеющих место в зоне низких частот.

Расчеты максимальных амплитуд проводились и в жидкости ограниченной глубины. На рисунках 4, 5 приведены результаты расчетов для сухогруза "Новгород" при $\beta = 90$ и $H/T = 1.2$.

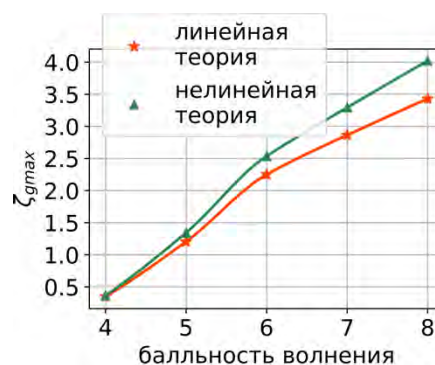


Рис. 4. ζ_{gmax} для сухогруза "Новгород" ($H/T = 1.2$)

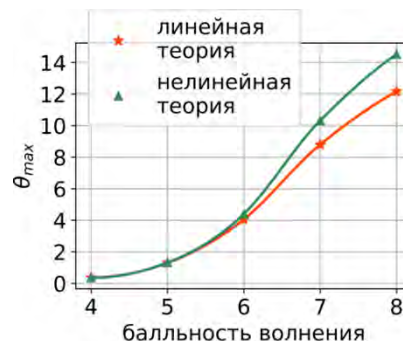


Рис. 5. θ_{max} для сухогруза "Новгород" ($H/T = 1.2$)

Как было отмечено в [8], [10], с уменьшением относительной глубины наблюдается многократный рост влияния нелинейных сил второго порядка. В последствии это проявляется и при расчетах на нерегулярном волнении. Так максимальное влияние нелинейных факторов для вертикальной качки сухогруза "Новгород" составляет 14%, бортовой – 16% (рис. 4, 5).

В большей степени влияние нелинейности второго порядка на нерегулярном волнении проявляется при расчете амплитуд ускорений в различных точках судна, что было отмечено в работах [11], [6] при использовании двумерных методов. Расчеты максимальных амплитуд ускорений на нерегулярном волнении проводились: на носовом перпендикуляре, на правом борту, и в точке предполагаемом расположении рубки.

На рисунках 6 – 11 приведены результаты расчетов ускорений для лесовоза "Николай Новиков" при $\beta = 90$ и бесконечно-глубокой жидкости.

При обозначении ускорений индекс 1 соответствует точке на носовом перпендикуляре, 2 – на правом борту, 3 – в точке расположения рубки.

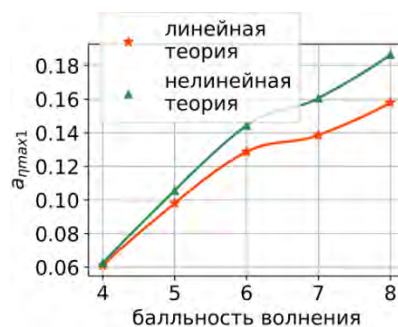


Рис. 6. $a_{\eta max1}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

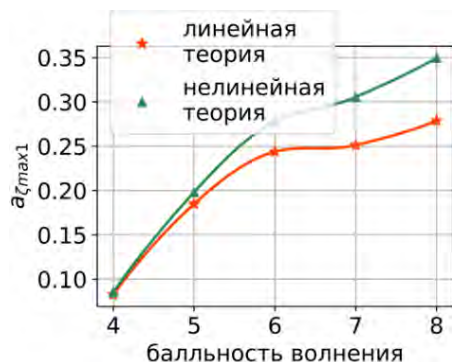


Рис. 7. $a_{\zeta max1}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

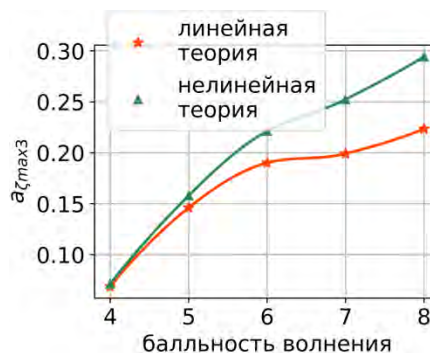


Рис. 11. $a_{\zeta max3}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

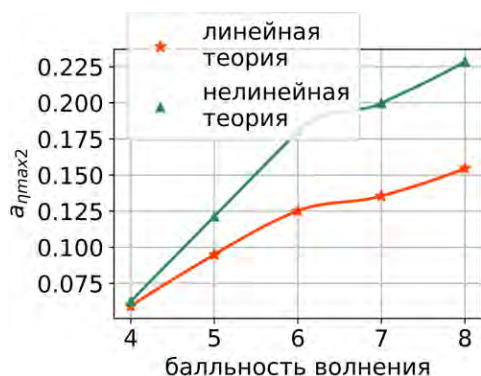


Рис. 8. $a_{\eta max2}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

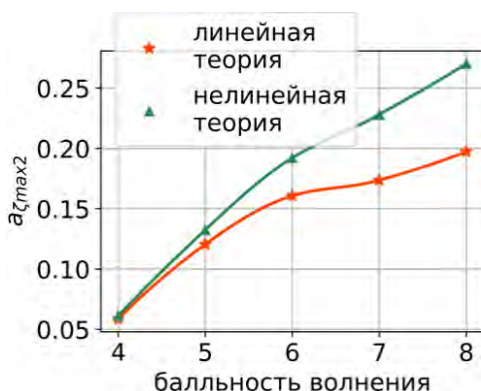


Рис. 9. $a_{\zeta max2}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

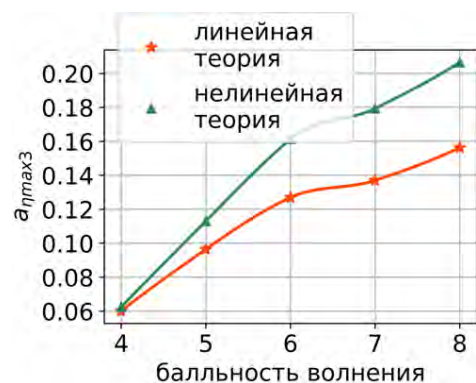


Рис. 10. $a_{\eta max3}$ для лесовоза "Николай Новиков" ($H/T = \infty$)

Для лесовоза "Николай Новиков" максимальное влияние нелинейных факторов второго порядка имеет место в точке на правом борту и достигает 53% для амплитуд поперечных ускорений на волнении 8 баллов и 35% для вертикальных ускорений (рис. 8, 9). В точке расположения рубки влияние нелинейности составляет для поперечных ускорений – 25% и для вертикальных – 36%. И в точке на носовом перпендикуляре – 16% и 26% соответственно (рис. 6, 7).

Увеличение влияния нелинейных факторов в точке на правом борту и в точке расположения рубки связано с влиянием амплитуд бортовой качки второго порядка. Также значительное влияние нелинейных факторов имеет место и на волнении 6, 7 баллов.

Максимальное влияние нелинейных факторов на ускорения было отмечено для танкера "Баскунчак". На рисунках 12 – 17 приведены результаты расчетов ускорения для сочетания курсового угла $\beta = 90$ и относительной глубины $H/T = 2.0$.

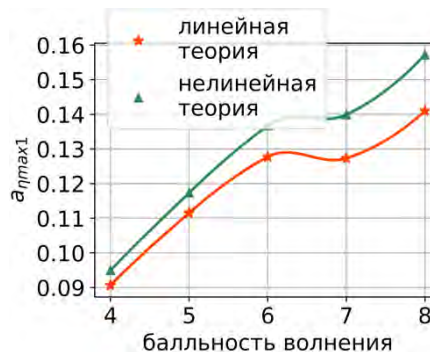


Рис. 12. $a_{\eta max1}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)

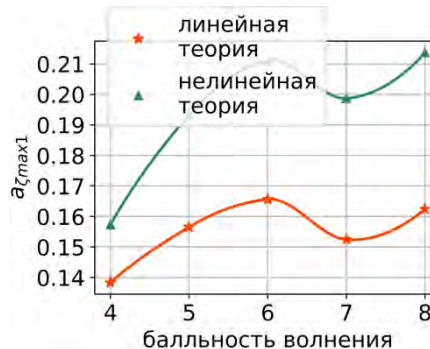
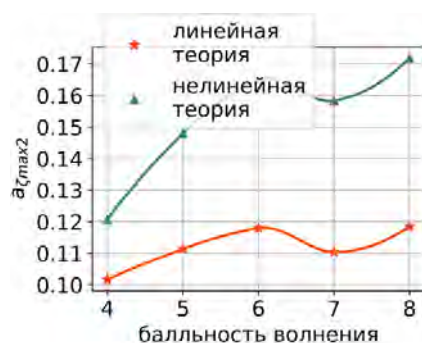
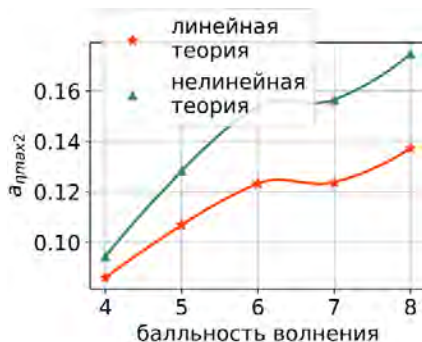
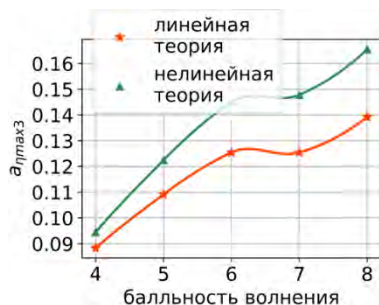
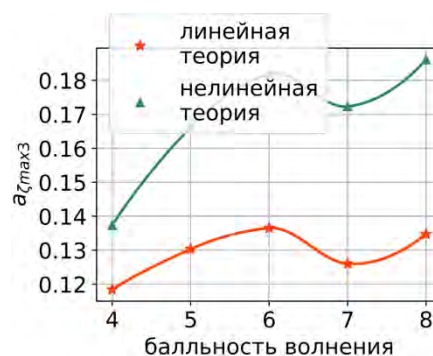


Рис. 13. $a_{\zeta max1}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)

Рис. 14. $a_{\eta max2}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)Рис. 15. $a_{\eta max2}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)Рис. 16. $a_{\eta max3}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)Рис. 17. $a_{\zeta max3}$ для танкера "Баскунчак" ($H/T = 2.0$)

Амплитуды нелинейных ускорений имеют максимальные значения в точке на правом борту, что обусловлено влиянием бортовой качки. Влияние нелинейных факторов на поперечные составляющие ускорений составляет 18% на 5-ти балльном волнении и 25% на 8-ми балльном (рис. 14), на вертикальные составляющие – 34% и 42% соответственно (рис. 17, 15).

Закключение

В статье изложен алгоритм расчета амплитуд качки и ускорений, возникающих в различных точках судна с учетом нелинейных сил второго порядка малости. Показано значительное влияние нелинейных сил на ускорения, особенно при уменьшении глубины.

В дальнейшем данный алгоритм может быть использован при оценке амплитудных значений скоростей с учетом нелинейных сил в различных точках судна.

Литература

1. Альбаев Д.А. Определение амплитуд нелинейной качки судна на основании трехмерной потенциальной теории. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 73 – 82.
2. Альбаев Д.А., Определение ускорений в различных точках судна, вызываемых нелинейной качкой на регулярном волнении в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2023. No 4 часть 1, С. 93 – 98.
3. Бондарь Н.Г. Нелинейные стационарные колебания. Изд. Наукова думка, Киев, 1974.
4. Бородай И.К., Нецветаев Ю. А. Качка судов на морском волнении. Л., Судостроение, 1969.
5. Луговский В.В. Качка корабля. СПб, 1999.
6. Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н., СПбГМТУ, 2005.
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Влияние курсового угла и скорости на амплитуды вторых гармоник нелинейной качки судна. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2023. № 70-71. С. 46 – 57.
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 319—327.
9. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А., Исследование амплитуд вторых гармоник нелинейной качки судна на регулярном волнении в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2023. No 2 часть 1, С. 24 – 31.
10. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А., Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 37—45.

11. Со Чжо Ту Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье. дисс. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., СПбГМТУ, 2014.
12. Wen S., Guan C., Sun S. Effect of water depth on wind-wave frequency spectrum. Chinese journal of oceanology and limnology, 1996, Vol. 14, № 2.

References

1. Al'baev D.A. Opredelenie amplitud nelineynoy kachki sudna na osnovanii trekhmernoy potencial'noj teorii [Estimation of non-linear amplitudes of ship motions based on three-dimensional potential theory]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2023; Special'nyy vypusk 1: 73 – 82.
2. Al'baev D.A., Opredelenie uskorenij v razlichnyh tochkah sudna, vyzyvayemyh nelineynoy kachkoj na regul'yarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya [Determination of accelerations at various points of the ship caused by nonlinear motions in regular waves in shallow water], Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. No 4 chast' 1, S. 93 – 98.
3. Bondar' N.G. (1974) Nelineynye stacionarnye kolebaniya [Nonlinear stationary oscillations]. Izd. Naukova dumka, Kiev.
4. Borodaj I.K., Necvetaev YU.A. (1982) Morekhodnost' sudov [Ship seakeeping]. L., Sudostroenie.
5. Lugovskiy V.V. (1966) Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya [Nonlinear problems of ship's seaworthiness]. L., Sudostroenie.
6. Semenova V. YU. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPBGMTU.
7. Semenova V.YU., Al'baev D.A. Vliyaniye kursovogo ugla i skorosti na amplitudy vtoryh garmonik nelineynoy kachki sudna [Effect of heading angle and velocity on the second harmonics of the nonlinear ship motions amplitudes]. Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2023. № 70-71. S. 46 – 57.
8. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2022) Chislennoe opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdel'nykh vidov kachki sudna v usloviyakh melkovod'ya. [Numerical determination of non-linear forces of the second order arising from the interaction of certain types of ship's motion in shallow water conditions] Morskie intellektual'nye tekhnologii. No 3, chast' 1, S. 125-133.
9. Semenova V.YU., Al'baev D.A., Issledovanie amplitud vtoryh garmonik nelineynoy kachki sudna na regul'yarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya [Investigation of the second harmonic amplitudes of a ship's non-linear motion in regular waves in shallow water], Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. No 2 chast' 1, S. 24 – 31.
10. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2022) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna v usloviyakh melkovod'ya. [Determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions in shallow water conditions] Morskie intellektual'nye tekhnologii. No 2, chast'.2. S. 37-46.
11. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'ye [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]. Dis. – Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy morskoy tekhnicheskij universitet.
12. Wen S., Guan C., Sun S. (1996) Effect of water depth on wind-wave frequency spectrum. Chinese journal of oceanology and limnology, Vol. 14, № 2.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Danil A. Al'baev, Ph.D. (Eng), senior lecture of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.05.2024
одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.05.2024
принята к публикации/accepted for publication 19.05.2024

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

Научная статья

УДК: 629.564.3/629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.008>

Исследование устойчивости морских выносных причальных устройств

Данцевич И.М.¹ dantsevich65@mail.ru, Косолап Ю.Г.¹ kosolap.aumsu@gmail.com,

Черкасов А.В.¹ alcher70@yandex.ru, Лютикова М.Н.¹ mnlyutikova@mail.ru,

Кравченко А.И.¹ nyanechkaanna@yahoo.com

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена проблематикой функционирования перегрузочных комплексов нефти с использованием выносных причальных устройств, обеспечивающих перегрузку сырья из подводных магистральных трубопроводов на танкер, используя систему гибких шлангов верхнего манифольда через поворотный стол-турель. В статье проведены исследования устойчивости и выживаемости выносных причальных устройств. В работе предложен научный подход оценки устойчивости и выживаемости плавучих терминалов по параметрам тяжения и угловым вращениям под действием возмущения системы танкер и выносное причальное устройство. В отличие от сложившейся практики расчётов по объёмному водоизмещению, устойчивость плавучего терминала по параметрам совместного влияния плавучего терминала и танкера на якорную систему под погрузкой под действием ветра и течения даёт хорошее приближение к задаче проектирования вновь создаваемых выносных причальных терминалов. В работе предложен метод исследования устойчивости морских выносных терминалов, основанный на расчёте кинетической энергии танкера с показателями присоединённых масс воды и объёмного водоизмещения. Выполнено моделирование методом конечных элементов распределения сил на якорную систему выносного причального устройства, с целью определения запаса устойчивости системы.

Ключевые слова: Судовое энергетическое оборудование, выносные причальные устройства, разворачивающий момент судна, динамика судна, грузовая операция, якорная система.

Для цитирования: Данцевич И.М., Косолап Ю.Г., Черкасов А.В., Лютикова М.Н., Кравченко А.И. Исследование устойчивости систем морских выносных причальных устройств, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 63—73. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.008

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.008>

Marine Stability Study remote mooring devices

Igor M. Dantsevich¹ dantsevich65@mail.ru, Yuri G. Kosolap¹ kosolap.aumsu@gmail.com,

Alexander V. Cherkasov¹ alcher70@yandex.ru, Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru,

Anna I. Kravchenko¹ nyanechkaanna@yahoo.com

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The relevance of the study is due to the problems of functioning of oil reloading complexes using remote mooring devices that ensure the reloading of raw materials from underwater main pipelines directly to the tanker through a system of flexible hoses of the upper manifold through a rotary table-turret. The article conducted studies of the stability and survival of remote mooring devices according to the indicators of stability and survival of remote mooring devices. The work proposes a scientific approach to assessing the stability and survival of floating terminals based on the parameters of gravity and angular rotation under the influence of disturbances in the tanker and remote mooring system. In contrast to the established practice of calculations based on volumetric displacement, the stability of a floating terminal in terms of the parameters of the joint influence of the floating terminal and tanker on the anchor system during loading under the influence of wind and current provides a good approximation to the problem of designing newly created remote mooring terminals. The paper discusses a method for calculating the fundamentals of stability of offshore marine terminals based on the calculation of the kinetic energy of a tanker with indicators of the attached masses of water and volumetric displacement. A finite element modeling of the distribution of forces on the anchor system of the remote mooring device was carried out.

Keywords: Ship power equipment, remote mooring devices, vessel turning moment, vessel dynamics, cargo operation, anchor system.

For citation: Igor M. Dantsevich, Yuri G. Kosolap, Alexander V. Cherkasov, Marina N. Lyutikova, Anna I. Kravchenko, Study of the stability of the anchor system of offshore mooring devices, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 63—73. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.008

Введение

Освоение шельфовых богатств арктических владений России началось с проекта Сахалин-1, который относится к одним из самых сложных нефтегазовых проектов в мире и первым в России с круглогодичными танкерными операциями в арктических условиях Дальнего Востока [1].

Так же, как и в других арктических районах грузовые операции производятся в условиях паковых льдов толщиной до 1,5 метров практически в течение 6-7 месяцев с сильным волнением и высокой сейсмической активностью.

Вторым примером уникальности производимых проектов по освоению технологий круглогодичных грузовых танкерных операций в условиях арктических владений рассмотрим проект «Варандей». Оператор проекта ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» обеспечивает эксплуатацию терминала с использованием стационарного морского ледостойкого отгрузочного причала.

Различные конструкции выносных причалов башенного типа как в случае с «Варандеем» или плавучего типа, тем не менее, имеют общую особенность конструкции, это поворотный стол, позволяющий при выполнении грузовых операций судну разворачиваться под действием ветровольновых нагрузок и течений. По этим причинам суда при грузовых операциях, если имеется возможность оперативного управления движительно-рулевым комплексом грузятся с работой пропульсивного комплекса, позволяющего удерживать позицию судна, не превышая предельных нагрузок на грузовые шланги и причальные устройства.

В Российской Федерации подобные плавучие, или стационарные выносные причальные устройства не изготавливаются, вся техника обычно импортного происхождения, соответственно вопросы теории и практики инженерного проектирования выносных причальных устройств находятся на стадии исследований и разработок [1-4].

Важным аспектом при грузовых операциях остаются вопросы маневрирования ресурсами судовой энергетической установки, при этом приходится учитывать фактор работы судовых ДВС в нерациональных режимах с нежелательными экологическими показателями. При этом наблюдается повышенный выброс сажи и вредных факторов работы ДВС, таких как оксиды азота, или соединения серы.

В существующих методиках расчёта ВПУ устойчивость и выживаемость, которых обеспечивается системой мёртвых якорей, обычно используются объёмные показатели водоизмещения и измерений теоретического (расчётного) судна.

В статье исследованы аспекты расчёта устойчивости и выживаемости ВПУ при грузовых операциях с учётом ресурсов судовой энергетической установки.

Согласно [2], бортовая парусность расчётного судна определяется как:

$$A_{нб} = k_a \cdot L_k^2; \quad (1)$$

Например, для танкера водоизмещением DWT = 300000 тн длина составляет $L_k = 324$ метра, бортовая парусность составляет, в грузу – $A_{нб} = 4439 \text{ м}^2$ расчёт по формуле (1) даёт величину:

$$A_{нб} = 0,08 \cdot 324^2 = 8\,398,08 \text{ м}^2$$

где $k_a = 0,04 \div 0,1$ для судна в грузу (балласте); $k_a = 0,07 \div 0,08$ (порожнее); L_k – длина судна, м., причём, значение коэффициента для определения парусности судна (k_a) перекрывает величины фронтальной парусности в грузу, балласте, а также порожнем состоянии судна.

Разница составляет величину 1,9 раза.

Аналогично для определения лобовой парусности $A_{лл} = 1098 \text{ м}^2$:

$$A_{лл} = K_l \cdot B_c^2; \quad (2)$$

$$A_{лл} = 1,2 \cdot 58^2 = 4\,036,8 \text{ м}^2$$

где K_l – коэффициент, равный $0,9 \div 1,2$ для судна в грузу (балласте); $1,2 \div 1,3$ – порожнем; B_c – ширина судна, м, разница составит 3,8 раза. Для танкера 300000 тн. формулы (1) и (2) дают завышенные результаты, поэтому для расчётов приведенные методики неэффективны.

Как видно, расчётные методики дают завышенные значения парусности судна, что приведёт к избыточному в расчётах запасу по распору якорной системы и соответственно в планировочных решениях, при проектировании выносных причальных устройств.

Необходимость совершенствования эксплуатации имеющихся в России терминалов с выносными причальными устройствами, это терминалы АО КТК (г. Новороссийск), проекты Сахалин-1 и Сахалин-2, терминал «Варандей» требует разработки методик расчёта устойчивости и выживаемости терминалов.

Комплекс мер по обеспечению последних состоит в проверке условий выживаемости и устойчивости с периодической заменой мёртвых якорей и самих плавучих причалов.

Расчётные и математические модели

С учётом проектов наиболее крупных судов эксплуатирующихся в мировом флоте рассмотрим параметры танкеров, приведенные в таблице 1:

– LR2 (Large Range 2) – крупнотоннажные танкеры 2-го класса (дедвейт – 80000-159999 DWT);

– VLCC (Very Large Crude Carrier) – очень большие перевозчики сырой нефти, крупнотоннажные танкеры 3 -го класса (дедвейт– 160000-320000 DWT).

Оценим устойчивость якорной стоянки (системы мёртвых якорей) теоретического судна на ВПУ.

Считаем, что держащей силой якоря называется наименьшее усилие, которое требуется приложить в направлении якоря, чтобы сорвать его с грунта, если привести усилие к весу якоря, то это отношение равно трём.

Держащая сила якоря зависит от его типа, характера грунта и длины якорной цепи. В противном случае якорь теряет часть держащей силы. Так, при тяговом усилии, направленном к поверхности грунта под углом 15° , держащая сила якоря уменьшается до 50%.

Длину провисающего бриделя ВПУ рекомендуется определять по формуле [3-4]:

$$l_6 = k_3 \cdot D + \Delta A, \quad (3)$$

для морского терминала АО КТК (с. Северная Озеровка г. Новороссийск)

$$l_6 = 1,37 \cdot 58 + 0,6 = 80 \text{ м}$$

где: D – глубина воды в месте установки якоря, м; ΔA – величина суммарных колебаний уровня моря, м. Значения $k_3 = l_6/D$ принимаются в пределах от 1,3

до 1,5 для цепного и от 1,3 до 2,5 для комбинированного бриделя.

Наибольшую величину держащей силы $T_{яу}$ якорного устройства определяют по формуле:

$$T_{яу} = kP_{я} + fP_{ц} \quad (4)$$

например, для бриделя 84 мм

$$T_{яу} = 1,3 \cdot (157 + 360) + 1,3 \cdot (470 - 80) \cdot 0,154 = 750,178 \text{ тн.}$$

а, для бриделя 95 мм

$$T_{яу} = 1,3 \cdot (157 + 360) + 1,3 \cdot (470 - 80) \cdot 0,193 = 769,951 \text{ тн.}$$

где k – коэффициент держащей силы, зависящей от типа якоря и характера грунта, для якорей-кессонов – 1,3 (коэффициент распластанности);

$P_{я}$ – масса якоря, т;

f – коэффициент трения цепи о грунт (в среднем равен 1,3);

$P_{ц}$ – вес якорной цепи, лежащей на грунте, $т \cdot l$ т;

l – длина якорной цепи, лежащей на грунте, м.

Таблица 1

Сравнительные характеристики танкеров DWT, тн – 100000 тн. DWT, тн – 300000 тн.

Параметр	Название	Значение	
		DWT–100000 тн	DWT – 300000 тн.
Disp, t	Водоизмещение полное	99.991	279400
DWT, t	Водоизмещение стандартное	100000	300000
Loa, m	Длина наибольшая (с бульбом)	243,8	332
Lpp, m	Длина между перпендикулярами	235,82	320
Lwl, m	Длина ватерлинии	235,82	325,5
Boa (B), m	Ширина судна	42	58
Bwl (B _{wl}), m	Ширина судна ниже ватерлинии	42	58
Осадка:			
Tf, м	Осадка судна в грузу	14,2	20,82
Tf_extreme, м	Осадка судна в грузу предельная	14,2	20,82
Ta, м	Осадка судна в грузу кормой	15	20,82
Ta_extreme, м	Осадка судна в грузу кормой предельная	15	20,82
Air draught, м ²	Надводный габарит судна	32	37,04
H_freeboard, м	Высота борта надводная	6,8	12,37
Ватерлиния и подводная часть: Зона среднего сечения судна			
Awl, м ²	Площадь ватерлинии	15964	19900
Aul, м ²	Зона подводного среднего сечения судна	565,7	1170
Abw, м ²	Зона подводного сечения судна (бак)	1481,23	3419,3
Ass, м ²	Зона подводного сечения судна (корма)	1557,51	3218
LSG, м	Абсцисса центра тяжести	-3,3	0,406
KG, м	Метацентрическая высота (центр тяжести)	16	17,627
KB, м	Центр плавучести	5,65	10,9
At, м ²	Площадь лобовой парусности	748	1098
Al, м ²	Площадь бортовой парусности	4553,08	4439

Расчёты якорной стоянки сводятся к действию постоянного долговременного тягового усилия. При действии тягового усилия в виде отдельных кратковременных рывков держащая сила может оказаться больше расчетной в 2–3 раза.

Условие безопасной якорной стоянки (без дрейфа на якорю) – сумма внешних воздействий должна быть меньше держащей силы якорного устройства: $R_{вн} \leq T_{яу}$.

Для теоретического судна DW 100000 тн.

Кинетическую энергию судна определим по формуле (6.62) из [3] для теоретического судна DW 100000 тн:

$$E = \xi_e(Q_x + Q_x^T) \cdot \sqrt{A_{нб}}; \quad (5)$$

где коэффициент для ξ_e систем с провисающим бриделем – 0,2; Q_x – продольная нагрузка от ветра на судно; Q_x^T – продольная нагрузка на судно от течения.

Расчёт динамики судна у ВПУ выполним учитывая возможный шквал со скоростью ветра 37,17 м/с, учитывая расчётные значения лобовой парусности по таблице 1:

$$p_a = \frac{1}{2} \rho_a U_v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,001226 \cdot 37,17^2 = 0,85; \quad (6)$$

$$Q_x = c_x p_a A_H = 1,0 \cdot 0,85 \cdot 748 = 635,8 \text{ кН}; \quad (7)$$

$$p_c = \frac{1}{2} \rho_c U_m^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,013 \cdot 0,5^2 = 0,13; \quad (8)$$

$$Q_x^T = c_c \cdot p_c \cdot A_{nc}; A_{nc} = \frac{A_{bw} + A_{ss}}{2}; \quad (9)$$

$$Q_x^T = 1 \cdot 0,13 \cdot 1\,519,27 = 197,51 \text{ кН};$$

$$E = 0,2(635,8 + 197,51) \cdot \sqrt{4\,553,08} =$$

11 245,77 кДж.

Согласно [3] масса судна определяется как:

$$M = \frac{D}{g} = \frac{99991}{9,81} = 10\,192,76 \text{ тс} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2, \quad (10)$$

Хорошие результаты для размерений танкера обеспечивает формула Шиманского [5], определим момент инерции массы:

$$J_x = \frac{D}{g} \cdot \left(\frac{B^2 \alpha^2}{11,4\delta} + \frac{H^2}{12} \right) \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{L \cdot B}{S_w} = \frac{243,8 \cdot 42}{15964} = 0,64, \quad (12)$$

$$J_x = 10\,192,76 \cdot \left(\frac{42^2 \cdot 0,64^2}{11,4 \cdot 0,55} + \frac{21^2}{12} \right) = 1\,549\,164,43 \text{ тн} \cdot \text{м}^2$$

$$M, \quad (13)$$

$$J_y = 0,07 \frac{\alpha}{g} \cdot D \cdot L^2 = 0,07 \cdot \frac{0,64}{9,81} \cdot 99991 \cdot 243,8^2 = 27\,141\,717,19 \text{ тн} \cdot \text{м}^2, \quad (14)$$

присоединённые массы танкера DW 100000 тн

$$\lambda_{33} = \frac{D}{g} = 10192,76 \text{ тн} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

$$\lambda_{44} = (0,25 \div 0,35) J_x = 0,3 \cdot 10344,75 =$$

$$464\,749,33 \text{ тн} \cdot \text{м}, \quad (16)$$

$$\lambda_{55} = J_y = 27\,141\,717,19 \text{ тн} \cdot \text{м}. \quad (17)$$

Из соотношения кинетической энергии судна и момента инерции (17) с присоединёнными массами воды найдём скорость разворота вдоль оси y:

$$\omega_y = \sqrt{\frac{2E}{J_y}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11\,245,77}{27\,141\,717,19}} = 0,02 \text{ рад/с} \quad (18)$$

Скорость вращения танкера DW 100000 тн. относительно ВПУ – 0,02 рад/с.

Масса тяжения танкера DW 100000 тн. на ВПУ

$$T_y = \lambda_{44} \cdot \omega_y^2 = 464\,749,33 \cdot 0,02^2 = 185,9 \text{ тн}. \quad (19)$$

Для теоретического судна DW 300000 тн:

$$E = \xi_e (Q_x + Q_x^T) \cdot \sqrt{A_{нб}}; \quad (20)$$

где коэффициент для ξ_e систем с провисающим бриделем – 0,2; Q_x – продольная нагрузка от ветра на судно; Q_x^T – продольная нагрузка на судно от течения.

Расчёт динамики судна у ВПУ выполним учитывая возможный шквал со скоростью ветра 37,17 м/с, учитывая расчётные значения лобовой парусности по таблице 1, по погодным условиям терминала г. Новороссийске:

$$p_a = \frac{1}{2} \rho_a U_v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,001226 \cdot 37,17^2 = 0,85; \quad (21)$$

$$Q_x = c_x p_a A_n = 1,0 \cdot 0,85 \cdot 1098 = 933,3 \text{ кН}; \quad (22)$$

$$p_c = \frac{1}{2} \rho_c U_m^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,013 \cdot 0,5^2 = 0,13; \quad (23)$$

$$Q_x^T = 1 \cdot 0,13 \cdot 3\,318,65 = 431,42 \text{ кН}; \quad (24)$$

$$E = 0,2(933,3 + 431,42) \cdot \sqrt{4439} = 18\,185,12 \text{ кДж},$$

$$M = \frac{D}{g} = \frac{279400}{9,81} = 28\,481,14 \text{ тс} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2, \quad (26)$$

используя формулу Шиманского, определим момент инерции массы (11-12) [5-8]:

$$\alpha = \frac{L \cdot B}{S_w} = \frac{332 \cdot 58}{19900} = 0,96,$$

$$J_x = 28\,481,14 \cdot \left(\frac{58^2 \cdot 0,96^2}{11,4 \cdot 0,75} + \frac{33^2}{12} \right) = 12\,912\,032,75 \text{ тн} \cdot \text{м}^2$$

M,

$$J_y = 0,07 \frac{\alpha}{g} \cdot D \cdot L^2 = 0,07 \cdot \frac{0,96}{9,81} \cdot 299400 \cdot 332^2 =$$

$$226\,062\,345,39 \text{ тн} \cdot \text{м}^2,$$

присоединённые массы танкера DW 300000 тн.

$$\lambda_{33} = \frac{D}{g} = 28\,481,14 \text{ тн} \cdot \text{м},$$

$$\lambda_{44} = (0,25 \div 0,35) J_x = 0,3 \cdot 12\,912\,032,75 =$$

$$8\,142\,515,16 \text{ тн} \cdot \text{м},$$

$$\lambda_{55} = J_y = 226\,062\,345,39 \text{ тн} \cdot \text{м}.$$

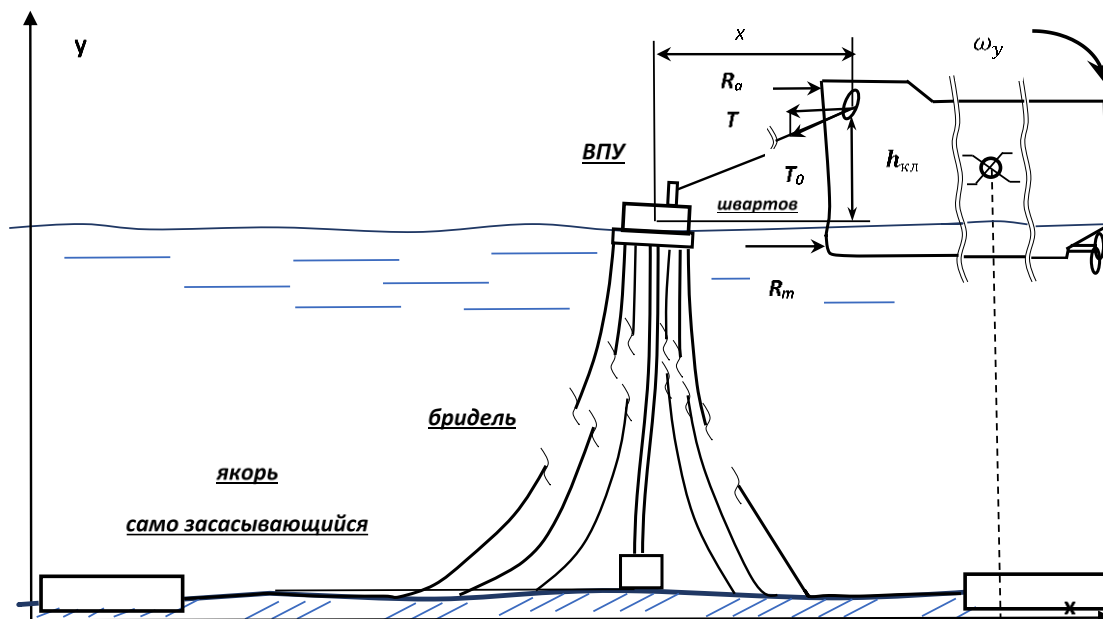


Рис. 1. Схема сил, действующих на судно, стоящее на якорь

Скорость вращения танкера DW 300000тн. относительно ВПУ составляет 0.0089 рад/с. Масса втяжения танкера DW 300000тн. на ВПУ – 644.968 тн.

К постоянным нагрузкам на ВПУ относятся нагрузки от веса элементов и усилия от предварительного натяжения якорных связей.

Временные длительные нагрузки вызваны изменением уровня моря, осадкой плавучего

корпуса, нагрузки, вызванные течением и давлением льда.

Кратковременные нагрузки вызваны ветром, волнами и навалом судна или тяжением швартовов.

Распределение сил, моментов и перемещений ВПУ показаны на рисунке 2.

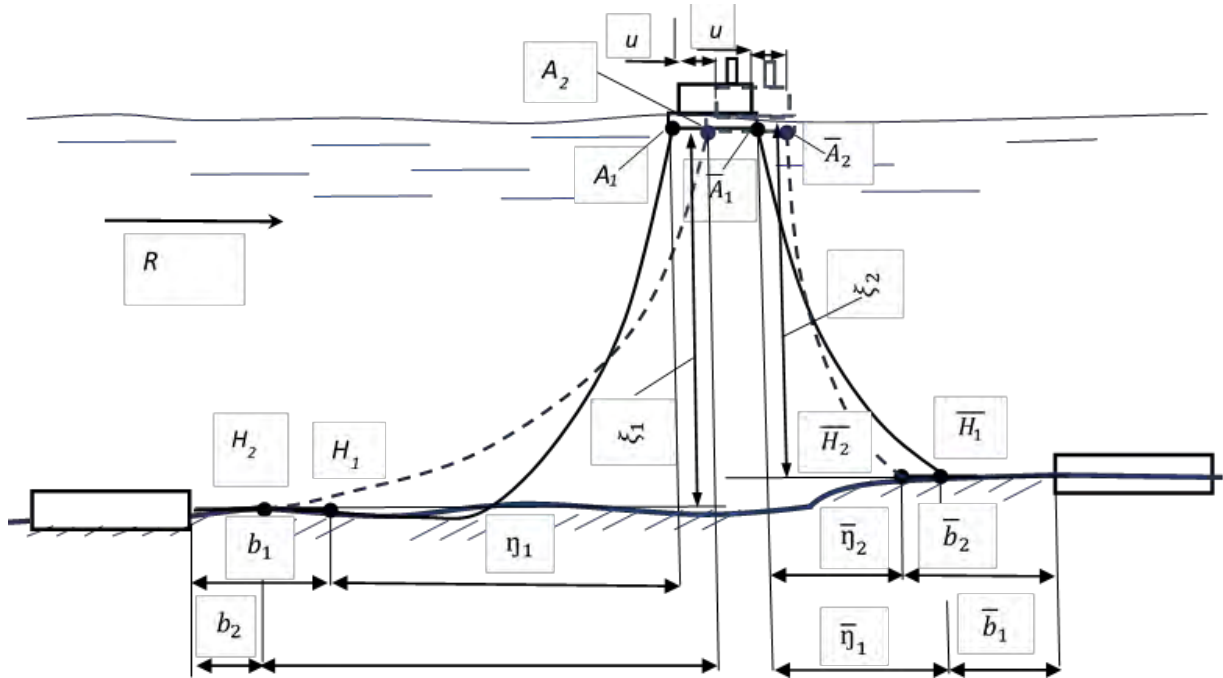


Рис.2. Расчётные величины якорной системы ВПУ-1

Значения амплитуды горизонтальной P_x , кН; вертикальной P_z , кН; силы и вращающего момента M_y , кН·м; от действия волн относительно горизонтальной оси ВПУ с учётом коэффициентов $k_t(X) = 0,9$; $k_t(Z) = 0,94$; определим как:

$$P_x = X \cdot (k_t(X)) \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot T \cdot L; \quad (27)$$

$$P_x = 0,65 \cdot 0,9 \cdot 1,013 \cdot 9,8 \cdot 4,1 \cdot 2 \cdot 12 = 571,46 \text{ кН};$$

$$P_z = Z \cdot (k_t(Z)) \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot B \cdot L; \quad (28)$$

$$P_z = 0,1 \cdot 0,94 \cdot 1,013 \cdot 9,8 \cdot 4,1 \cdot 12 \cdot 12 = 550,94 \text{ кН};$$

$$M_y = \frac{M}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot B^2 \cdot L; \quad (29)$$

$$M_y = \frac{0,3}{4} \cdot 1,013 \cdot 9,8 \cdot 4,1 \cdot 12^2 \cdot 12 = 5275,02 \text{ кН};$$

где: X, Z, M – коэффициенты, принимаемые в зависимости от отношения осадки $T = 4$ м к глубине воды d ; отношение для расчётов принимаем $\frac{T}{d} = 0,06$; h – высота волн обеспеченностью 5%; λ – длина волн, м; соответственно $X = 0,65$; $Z = 0,1$; $M = 0,3$; значения ширины B и длины L приняты 12 м; плотность воды в Чёрном море летняя – 1,011 т/м³, зимняя – 1,013 т/м³; отношение ширины к осадке составит $\frac{B}{T} = 4$.

Например, для Чёрного моря, фазовые переменные волнения определяем как; $\alpha_x = 0,25$; $\alpha_z = 0,5$; $\alpha_M = 0,3$.

Величины присоединённых масс μ_{xx} ; μ_{zz} [кН·с²·м⁻¹] и коэффициенты волнового сопротивления λ_{xx} ; λ_{zz} [кН·с²·м⁻¹] при горизонтальных и вертикальных колебаниях ВПУ, а также присоединённые моменты инерции $\mu_{\theta\theta}$ [кН·с·м]:

$$\mu'_{xx} = 3,14 \cdot \mu_{22} \cdot \rho \cdot T^2 \cdot L; \quad (30)$$

$$\mu'_{22} = 3,14 \cdot 0,75 \cdot 1,013 \cdot 4 \cdot 12 = 114,51 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$\mu_{zz} = 0,79 \mu_{33} \rho \cdot B^2 L; \quad (31)$$

$$\mu'_{33} = 0,79 \cdot 0,55 \cdot 1,013 \cdot 12^2 \cdot 12 = 760,58 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$\mu_{\theta\theta} = 0,2 \cdot \mu_{44} \cdot \rho \cdot B^4 \cdot L; \quad (32)$$

$$\mu'_{44} = 0,2 \cdot (-0,7) \cdot 1,013 \cdot 12^4 \cdot 12 = -35289,35 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м};$$

$$\lambda_{xx} = 3,14 \cdot \lambda_{22} \cdot \rho \cdot \sigma \cdot T^2 \cdot L; \quad (33)$$

$$\lambda'_{22} = 3,14 \cdot 0,7 \cdot 1,013 \cdot 0,8 \cdot 4 \cdot 12 = 85,5 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$\lambda_{zz} = 0,79 \lambda_{33} \rho \cdot \sigma \cdot B^2 L; \quad (34)$$

$$\lambda'_{33} = 0,79 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 12^4 \cdot 12 = 4938,02 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$\lambda_{\theta\theta} = 0,2 \cdot \lambda_{44} \cdot \rho \cdot \sigma \cdot B^4 \cdot L; \quad (35)$$

$$\lambda'_{44} = 0,2 \cdot (-0,03) \cdot 1,013 \cdot 0,8 \cdot 12^4 \cdot 12 =$$

$$-47,489 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м};$$

где μ_{ii} , λ_{ii} ($i = 2,3,4$) – безразмерные коэффициенты; σ – частота волн, определяемая из уравнения $\sigma = g \cdot k \cdot \tanh(kd)$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число м⁻¹; d – глубина воды, м, определяемые по условиям выживаемости в бассейне Чёрного моря.

Определим натяжение бриделей в точке крепления А1 [м] к ВПУ, как показано на рисунке 2. Параметр А1 [м], определяется из выражения, учитывая, что конструктивное расположение позволяет одновременно работать попарно по 3-м связям (фронтальным или тыловым, всего их 6) [3]:

$$A_1 = \frac{h_1}{6 \cdot q}; \quad (36)$$

$$A_1 = \frac{74,4}{68,75} = 1,08;$$

где: $q = 11,46$ т·п.м. – вес бриделя (одного) от клиза до касания грунта в воде; h_1 – длина подвеса

бриделя (74,4 метров) за счёт осадки ВПУ (5,6 метра), длина подвеса бриделя уменьшится на 5,6 м.

Расстояние от клюза ВПУ до снижения к грунту до места заглубления в грунт η_1' (при фронтальной работе якорной системы):

$$\eta_1' = A_1 \text{Arch} \left(1 + \frac{\xi_1}{A_1} \right); \quad (37)$$

$$\eta_1' = 1,08 \cdot \text{Arch} 49,51 = 4,96 \text{ м};$$

Горизонтальная проекция η_1 [м] и длина l1 свободного провиса определим как:

$$\eta_1 = \eta_1' + \frac{H_1}{EF} A_1 sh \frac{\eta_1'}{A_1}; \quad (38)$$

$$\eta_1 = 4,96 + \frac{74,4}{65,10} \cdot 1,08 \cdot 49,37 = 65,9 \text{ м};$$

$$\xi_1 = A_1 sh \frac{\eta_1'}{A_1}; \quad (39)$$

$$\xi_1 = 1,08 \cdot 49,37 = 53,32 \text{ м}.$$

Сила полного натяжения цепи T_1 [кН], в цепной опоре (клюзовой точке), а также вертикальная составляющая V_1 [кН], силы натяжения T_1 :

$$T_1 = q(A_1 + \xi_1); \quad (40)$$

$$T_1 = 11,46 \cdot 6 \cdot (1,08 + 53,32) = 3740,54 \text{ кН}$$

(381,3 т);

$$V_1 = q\xi_1; \quad (41)$$

$$V_1 = 11,46 \cdot 6 \cdot 53,32 = 3666,28 \text{ кН (373,73 т)}.$$

Пересчёт в традиционную суммарную величину нагрузок (т):

$$T_{\Sigma} = \sqrt{T_1^2 + V_1^2} / 9,81 = 533,91 \text{ т}.$$

Учитывая распределённый характер нагрузок на якорную систему из 6 (шести) бриделей, нагрузка на один якорь:

$$T_{я1} = \frac{533,91}{6} = 88,99 \text{ т}.$$

Горизонтальная нагрузка на бридель H_1 [кН], (распор цепи) определяется как:

$$H_1 = T_1 + R; \quad (42)$$

$$H_1 = 3740,54 + \sqrt{1600,09^2 + 550,94^2} = 5432,82 \text{ кН} \approx (553,80 \text{ т})$$

где $R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ – сумма внешних сил [кН], действующая на ВПУ.

Горизонтальное перемещение u [м], ВПУ определим:

$$u = \left(A_1 sh \frac{\eta_1'}{A_1} - \eta_1' \right) - \left(A_2 sh \frac{\eta_2'}{A_2} - \eta_2' \right) + \frac{S}{EF} (H_2 - H_1); \quad (43)$$

$$u = 2,19 \text{ м};$$

в максимальном значении.

Результаты

Надёжность системы мёртвых якорей определяется на основе расчёта динамики ВПУ с судном при выполнении грузовых операций. Расчёт нагрузок на стенки якоря-кессона при взаимодействии с грунтом проводился в соответствии "Рекомендациями..." [7] аналогично кольцевым якорям, заглублённым в грунт.

Расчётная нагрузка на стенки якоря-кессона определялась как разность между пассивным и активным давлениями. Пассивное давление на лицевую стенку и активное давление на тыловую стенку якоря-кессона определялись по формулам (40) – (42) аналогично определению держащей способности якоря-кессона. Основное внимание в настоящем разделе уделялось оценке пассивного и

активного давлений на внутренние стенки якоря-кессона с учётом глубины погружения "юбки" и расстояния между стенками с учётом "силосного эффекта".

При определении пассивного и активного давлений на тыловую и внутренние стенки в соответствии с "Рекомендациями..." [4] сцепление грунта не учитывалось. В соответствии с "Рекомендациями..." [4] после преобразования формул для пассивного и активного давлений на стенки кольцевых якорей применительно к прямоугольной форме рассматриваемого якоря-кессона, средняя ордината (по высоте якоря) пассивного давления на внутренние стенки якоря-кессона может быть вычислена по формуле:

$$q_{пв} = \gamma \frac{h_a}{2} \cdot \left(1 + \frac{4}{\pi} \right) - \frac{d_{вн}}{h_a} \cdot [\gamma \cdot h_a \cdot tg\varphi + c], \quad (44)$$

где:

$d_{вн}$ – расстояние между внутренними стенками якоря-кессона, принятое равным $d_{вн}=5,0$ м.

Средняя ордината активного давления на внутренние стенки якоря-кессона может быть вычислена по обычной формуле:

$$q_{ав} = \gamma \frac{h_a}{2} \cdot \lambda_a; \quad (45)$$

где; λ_a – коэффициент активного давления.

Параметры, определяемые из соотношения продольной горизонтальной составляющей сопротивления грунта по боковой грани якоря-кессона $E_{пб}$:

$$E_{пб} = \frac{1}{2} \cdot \gamma (h_a + h_3)^2 \cdot L \frac{\cos(90-\beta-\delta)}{\cos\beta} \cdot [\lambda_p' \sin\beta + \lambda_a]; \quad (46)$$

где:

β – угол между боковой гранью и диаметральной плоскостью якоря, в рассматриваемом случае $\beta=00$;

λ_p' – коэффициент пассивного давления грунта по боковой поверхности:

$$\lambda_p' = tg^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad (47)$$

λ_a – коэффициент активного бокового давления грунта:

$$\lambda_a = tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right); \quad (48)$$

L – длина боковой грани якоря, равная $L=30$ м – для прямоугольного якоря.

Величина активного бокового давления на тыловую сторону якоря-кессона определялась по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma}{2} \cdot (h_a + h_3)^2 \cdot b \cdot \lambda_a; \quad (49)$$

где:

b – ширина якоря по тыловой стороне, равная $b=10$ м – для прямоугольного якоря.

Расчёты проводились для случая полного заглубления якоря-кессона на расчётную глубину 5,0 м.

В результате расчётов показано, что средняя ордината суммарной эпюры давления (пассивное минус активное) на лицевую стенку якоря-кессона при заглублении на 5 м (на высоте 2,5 м от подошвы кессона) составляет порядка 10,0 кПа при характеристиках грунта: $\varphi=110$, $c=4$ кПа для нижнего предела сопротивления недренированному сдвигу.

Для внутренних стенок якоря-кессона аналогичные средние ординаты эпюр давления составляют 5,9 кПа.

При характеристиках грунта $\varphi=21,40$, $c=8$ кПа средняя ордината эпюры давления на лицевую стенку якоря-кессона возрастает до 28,0 кПа. При расчётных характеристиках грунта, $\varphi=9,570$, $c=2,67$ кПа (с учётом коэффициента надёжности по грунту) средняя ордината эпюры давления на внутренние стенки якоря возрастает до 7,4 кПа.

Для расчётов прочности корпуса якоря-кессона может приниматься треугольная эпюра давлений на стенки якоря-кессона. Соответственно максимальная ордината эпюры давлений по подошве якоря-кессона может приниматься равной удвоенной величине средней ординаты, т.е. от 20,0 кПа до 56,0 кПа для лицевой стенки и до 14,7 кПа для внутренних стенок.

Расчётные эпюры давлений на стенки якоря-кессона показаны на рисунках 3 и 4. Полученные значения для характеристик грунта,

соответствующих верхнему пределу сопротивления сдвигу ($\varphi=21,40$, $c=8$ кПа) ординаты эпюры давления на лицевую стенку якоря превышают давление (29,5 кПа).

Полная величина нагрузки на лицевую стенку якоря-кессона достигает 540,0-1425,0 кН (соответственно для нижнего и верхнего пределов сопротивления сдвигу), а на внутренние стенки - до 375,0 кН.

В качестве основной расчётной схемы для оценки прочности корпуса якоря-кессона рекомендуется принимать схему на рис.3а, при характеристиках грунта, соответствующих нижнему пределу сопротивления сдвигу с учётом наибольших давлений на внутренние стенки якоря. Целесообразно проверить также прочность якоря по дополнительной (проверочной) схеме на рис.3б, соответствующей максимально возможным нагрузкам на различные стенки якоря.

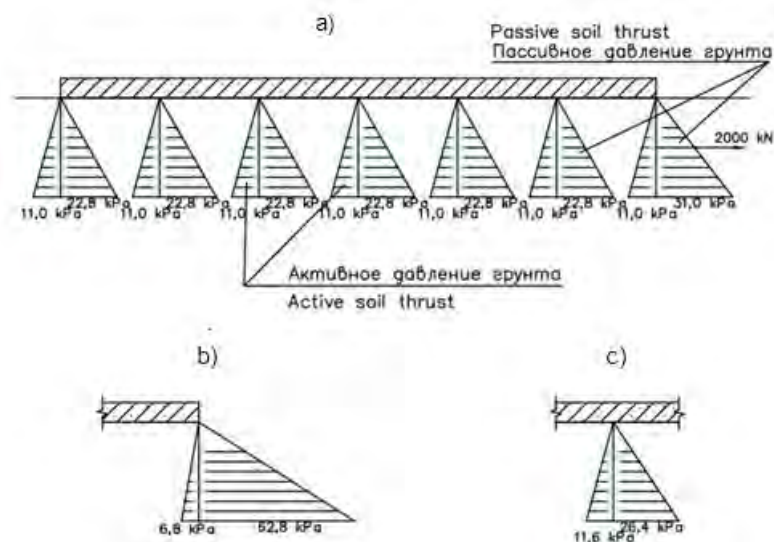


Рис. 3. Расчётные эпюры давления грунта на стенки якоря-кессона: а–при характеристиках грунта $\varphi=11^\circ$, $c=4$ кПа; б – при характеристиках грунта $\varphi=21,4^\circ$, $c=8$ кПа; в– при характеристиках грунта $\varphi=9,57^\circ$, $c=2,67$ кПа.

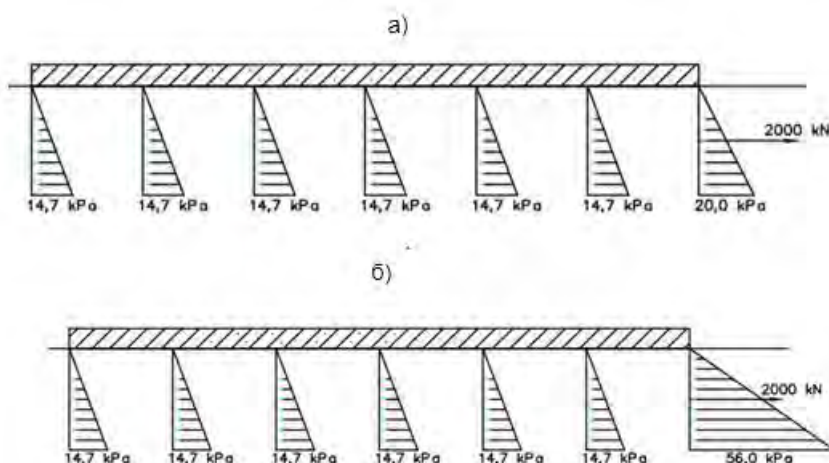


Рис. 4. Расчётные эпюры суммарного давления грунта на стенки якоря-кессона: а–основная ($\varphi=110$, $c=4$ кПа для лицевой стенки; $\varphi=9,570$, $c=2,67$ кПа для внутренних стенок); б–проверочная ($\varphi=21,40$, $c=8$ кПа для лицевой стенки)

Моделирование нагрузок на якорь кессон средствами пакета ELCUT 6.0

В соответствии с рассчитанными значениями нагрузок, включающих нагрузку от гидростатического давления, учитывая, что глубина залегания якоря-кессона составляет 58 метров, величина гидростатического давления составит 5,8 Бар относительно поверхности моря, или 580 кН/м^2 , характеристики грунтов:

- при глубине от 0 до 2,5 м ниже поверхности дна - $\gamma = 2,5 \text{ кН/м}^3$;
- при глубине от 2,5 до 5,0 м ниже поверхности дна - $\gamma = 4,0 \text{ кН/м}^3$.

Расчётная модель строилась средствами геометрии с назначением нагрузок последовательно:

блоки – конструктивные элементы бетонная плита, стальные перегородки; ребра – поверхности испытывающих статическое давление от толщи воды, грунтов по глубине нахождения конструктивных блоков; вершины – грани конструктивных элементов сопрягающихся рёбер по всему конструктиву якоря – кессона, описанная модель приведена на рисунке 5.

Выбор расчётных сеток обеспечивается автоматическим заданием в шаге 0.001 м в зависимости от концентрации действующих сил на якорь-кессон, как показано на рисунке 5. Заделка якоря – кессона вызывает местное уплотнение грунта практически по всему объёму якоря-кессона.

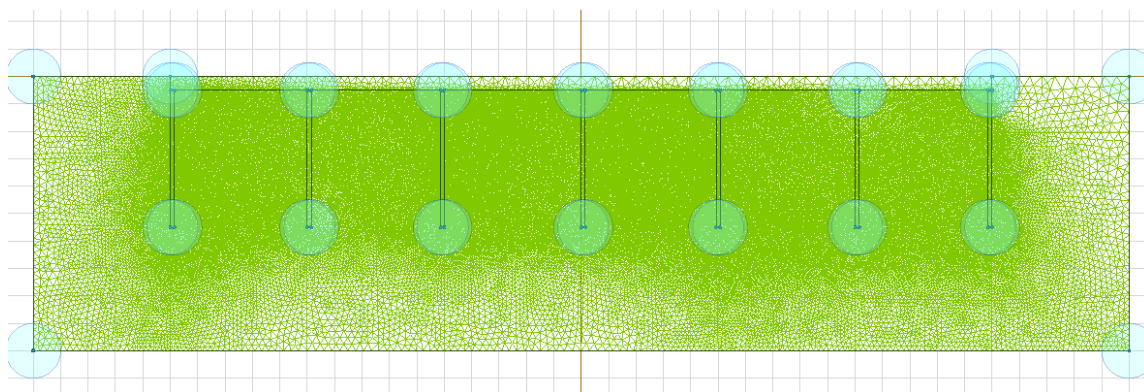


Рис. 5. Расчётная схема якоря-кессона (метод конечных элементов)

Граничные условия выбирались из условия удалённости границы граней и вершин моделей от сплошного невозмущённого грунта.

На рисунке 6 приведены статические нагрузки на якорь кессон без тяжения со стороны цепного

бриделя. Дальнейшие расчёты, приведённые на рисунках 6 и 7 с номинальной нагрузкой и превышенной на 50% (1,5 раза).

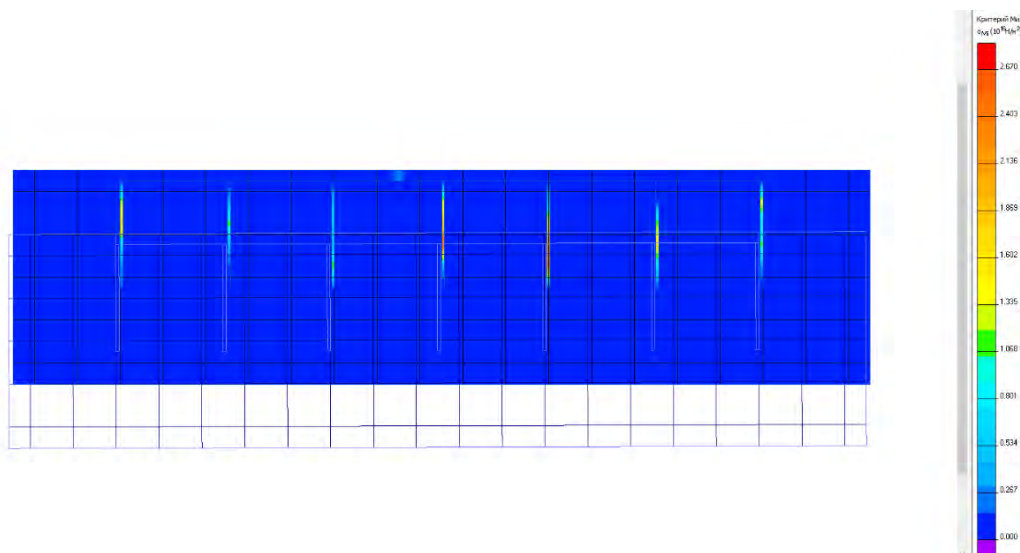


Рис. 6. Результат расчёта механических напряжений в конструктивном элементе якоря-кессона

Картина распределения механических напряжений в свободно-опёртой конструкции, показывает дальнейшее погружение якоря-кессона в грунт относительно начального уровня заделки -5м.

Действие со стороны цепного бриделя также показывает дальнейшее засасывание якоря-кессона в грунт по действием гидростатического давления.

Механические напряжения, возникающие вследствие рабочих нагрузок, могут быть источником усталостных изменений в корпусе якоря-кессона в районе заделок стальных стенок в бетонную плиту.

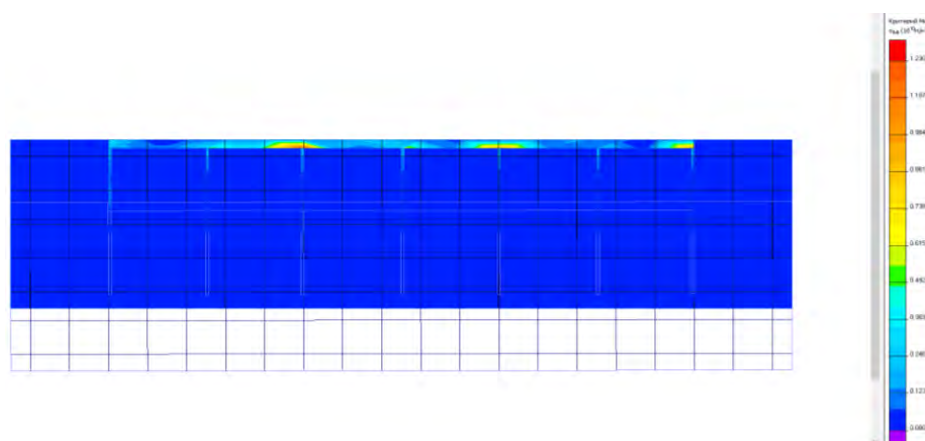


Рис. 7. Результаты расчёта механических напряжений в конструкции якоря-кессона при воздействии номинальных нагрузок, общая картина механических напряжений в корпусе якоря-кессона

Выводы

Полученные значения кинетической энергии вращения теоретического судна DWT 100000 тн. и DWT 300000 тн. при якорной стоянке на выносных причальных устройствах позволяют говорить о лучшем приближении в расчётных значениях спецификаций изготовителей оборудования, в сравнение с методикой обустройства якорных стоянок по показателям объёмного водоизмещения теоретического судна.

При разработке грузовых систем с магистральными трубопроводами, проложенными на шельфе полученная и апробированная методика даёт наилучшее приближение.

Стальной якорь-кессон принятых размеров (30×10×5 м) и массы (303 т в воде) при заглублении в грунт дна на расчётную величину 5,0 м в целом обеспечивает достаточную держащую способность в рассматриваемых естественных условиях при заданных внешних нагрузках (горизонтальное усилие в якорной цепи на уровне дна - 216 тс).

Основным фактором (до 72%), определяющим держащую способность якоря-кессона по схеме плоского сдвига, является сопротивление сдвигу.

Коэффициент устойчивости якоря на плоский сдвиг по различным Российским нормам в рассматриваемых условиях составляет от 1,52 до 3,2 соответственно для нижнего и верхнего пределов сопротивления сдвигу. Даже при рассмотренных в расчёте наиболее неблагоприятных грунтовых условиях $\phi=9,570$, $c=2,67$ кПа (с учётом коэффициента надёжности по грунту) коэффициент устойчивости якоря на плоский сдвиг по различным нормам составляет от 1,18 до 1,3. Полученные значения коэффициентов устойчивости

соответствуют требованиям Российских норм для сооружений I класса капитальности.

Коэффициент устойчивости якоря SPM1-P4 по схеме глубинного сдвига составляет порядка 1,67. Полученное значение коэффициента устойчивости значительно превышает допускаемую по Российским нормам величину данного коэффициента (1,3), т.е. устойчивость якоря SPM1-P4 по схеме глубинного сдвига при действии расчётных нагрузок обеспечивается.

В соответствии с Российскими нормами для обеспечения требуемой держащей способности (при расчётной сдвигающей нагрузке 216 тс) в принципе возможно неполное заглубление якоря-кессона на величину не менее 3,7 м. Если рассматривать нагрузку как нормативную, то, согласно выполненным расчётам, требуется заглубление якоря на величину не менее 4,7 - 5,0 м.

Заглубление якоря-кессона в грунт дна под собственным весом ориентировочно может составить - до 2,9 м. Для заглубления якоря-кессона на расчётную глубину 5,0 м необходимо создать дополнительную вертикальную нагрузку на якорь-кессон в воде порядка 3894,2 кН (397,0 тс) или обеспечить разность гидростатического давления над и под верхней плитой якоря не менее 13,0 кПа. Для извлечения (при необходимости) якоря-кессона из грунта в зависимости от его заглубления от 2,0 до 5,0 м требуется приложить к якорю нагрузку от 4242,8 кН до 9862,5 кН или создать давление извлечения от 14,1 кПа до 32,9 кПа.

Суммарная нагрузка на лицевую стенку якоря-кессона составляет порядка 540,0 кН, а на внутреннюю - до 375,0 кН.

Литература

1. Смирнов, К. А., Моряков, И. А., Лебедев, В. В., & Попко, А. О. Отгрузка нефти с морских платформ и выносных причальных устройств. *Морской вестник*, (1), 2010, 63-65.
2. Левачев, С. Н., & Халецкий, В. С. Анкерные и якорные устройства в гидротехническом строительстве. *Вестник МГСУ*, 2011,(5), 58-68.
3. Хижняков, В., & Орлов, Д. (2022). *Сооружение и ремонт подводных трубопроводов: учебное пособие* 2019, 276 с.
4. СП 38.13330.2018 Свод правил нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

5. Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л., «Судостроение». 1976.
6. Инструкция по расчёту и проектированию плавучих рейдовых причалов ВМФ. ВСП 33-02-05– М.: Издательство МО. 2005.
7. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». - СПб., изд. НИЦ МОРИНТЕХ, 2014, 872 с.
8. Dantsevich I.M., Kosolap Y.G., Cherkasov A.V. APPROXIMATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PIPE BASE METAL IN THE UNDERWATER OFFSHORE GAS PIPELINE "NORD STREAM-2 В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering"" 2021. С. 012018
9. Dantsevich I.M., Kosolap Y.G., Cherkasov A.V. DYNAMICS OF BRITTLE CRACKS UNDER THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering" 2021. С. 012019.
10. Kondratiev S.I., Dantsevich I.M., Tarasenko A.A PIPELINE MONITORING TECHNOLOGY IN NORD STREAM 2. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering"" 2021. С. 012021.
11. Гайкович, А. И., Никитин, Н. В., Суслов, А. Н., & Хань, Б. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана. Морские интеллектуальные технологии. 2019, С. 80.

References

1. Smirnov, K. A., Moryakov, I. A., Lebedev, V. V., & Popko, A. O. Oil shipment from offshore platforms and remote mooring devices. Morskoy Vestnik, (1), 2010, 63-65.
2. Levachev, S. N., & Khaletsky, V. S. Anchor and anchor devices in hydraulic engineering construction. Bulletin of MGSU, 2011, (5), 58-68.
3. Khizhnyakov, V., & Orlov, D. (2022). Construction and repair of underwater pipelines: textbook 2019, 276 p.
4. SP 38.13330.2018 Code of rules for loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships).
5. Blagoveshchensky S.N., Kholodilin A.N. Handbook on ship statics and dynamics. In two volumes. Ed. 2nd, revised And additional Volume 2. Dynamics (rolling) of the ship. L., "Shipbuilding". 1976.
6. Instructions for the calculation and design of floating raid berths of the Navy. VSP 33-02-05 – М.: Publishing house MO. 2005.
7. Gaikovich A.I. Theory of design of displacement ships and vessels. Т.2. Analysis and synthesis of the "Ship" system. - St. Petersburg, ed. SRC MORINTEKH, 2014, 872 p.
8. Dantsevich I.M., Kosolap Y.G., Cherkasov A.V. APPROXIMATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PIPE BASE METAL IN THE UNDERWATER OFFSHORE GAS PIPELINE "NORD STREAM-2 В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering"" 2021. С. 012018
9. Dantsevich I.M., Kosolap Y.G., Cherkasov A.V. DYNAMICS OF BRITTLE CRACKS UNDER THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering" 2021. С. 012019.
10. Kondratiev S.I., Dantsevich I.M., Tarasenko A.A PIPELINE MONITORING TECHNOLOGY IN NORD STREAM 2. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering"" 2021. С. 012021.
11. Gaikovich, A. I., Nikitin, N. V., Suslov, A. N., & Han, B. Analytical method for determining the power of a catamaran power plant. Marine intelligent technologies. 2019, p. 80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Данцевич Игорь Михайлович кандидат технических наук, исполнительный директор НИИ: ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93. e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Dantsevich Igor M. Ph.D. (Eng), Executive Director of Research Institute: Admiral Ushakov maritime state university, 353924, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Косолап Юрий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетических судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93 e-mail: kosolap.aumsu@gmail.com

Yuri G. Kosolap, Ph.D.(Eng), Candidate of Technical Science, Operation of ship mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: kosolap.aumsu@gmail.com

Черкасов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: alcher70@yandex.ru

Alexsandr V. Cherkasov, Ph.D.(Eng), Candidate of Technical Science, Operation of ship mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: alcher70@yandex.ru

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Кравченко Анна Ивановна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: nyanechkaanna@yahoo.com

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

Anna I. Kravchenko, Ph.D. (Edu), Associate Professor. Foreign Languages Department lecturer, admiral Ushakov State University, 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail nyanechkaanna@yahoo.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 12.05.2024.

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.009>**Определение основных элементов пульсатора двухфазного потока для осуществления промывки судовых систем**Лебедева Е.Г.¹ eg.lebedeva@narfu.ru¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, филиал САФУ
в г. Северодвинске

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция и определены основные элементы пульсатора, одновременно являющимся и смесителем, предназначенного для создания устойчивого течения двухфазного потока. Пульсатор-смеситель применяется в качестве элемента смешения, создающего пульсацию в смешанном двухфазном потоке. Такой поток используется для повышения результативности промывки судовых систем, увеличивающих ее качество и сокращающее сроки промывки. Проблема данного вида промывки состоит в расслоении смешанного потока на фазы с течением времени. Для получения хорошего результата промывки двухфазным потоком необходимо создать устойчивость такого потока за счет возбуждения в нем пульсационных колебаний. Пульсирующие колебания в потоке связаны с особенностями конструкции смесителя. Собственная частота колебаний пульсатора или диффузорной части смесителя совпадает с частотой колебаний пузырьков газа (воздуха) в потоке воды. Явление резонанса в потоке смеси провоцирует создание пузырьков определенного диаметра, обладающих повышенной адгезионной способностью по отношению к частицам технологических загрязнений. Колебательный процесс в потоке жидкости распространяется на значительные расстояния. Явление резонанса разбивает более крупные пузырьки воздуха на мелкие, не позволяет им сливаться и расслаиваться потоку. Такой пульсирующий смешанный поток можно применять в качестве промывочного не только для промывки судового оборудования, но и для промывки протяженных и разветвленных судовых систем.

Ключевые слова: Колебания, частота собственных колебаний, двухфазный поток, пульсатор, смеситель, промывка судовых систем, интенсификация

Для цитирования: Лебедева Е.Г. Определение основных элементов пульсатора двухфазного потока для осуществления промывки судовых систем, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 74—81. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.009

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.009>**Determination of the main elements of a two-phase flow pulsator for flushing ship systems**Elana G. Lebedeva¹ eg.lebedeva@narfu.ru¹The Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, branch of the NARFU in Severodvinsk

Abstract. The article considers the design and defines the main elements of the pulsator, which is also a mixer designed to create a stable flow of a two-phase flow. A pulsator mixer is used as a mixing element that creates pulsation in a mixed two-phase flow. Such a flow is used to improve the efficiency of flushing shipboard systems, increasing its quality and reducing the time of flushing. The problem with this type of flushing is the stratification of the mixed flow into phases over time. To obtain a good result of flushing with a two-phase flow, it is necessary to create stability of such a flow by exciting pulsation vibrations in it. Pulsating fluctuations in the flow are associated with the design features of the mixer. The natural oscillation frequency of the pulsator or the diffuser part of the mixer coincides with the oscillation frequency of gas (air) bubbles in the water stream. The phenomenon of resonance in the flow of the mixture provokes the creation of bubbles of a certain diameter with increased adhesive ability with respect to particles of technological contaminants. The oscillatory process in the fluid flow extends over considerable distances. The resonance phenomenon breaks larger air bubbles into small ones, preventing them from merging and delaminating the flow. Such a pulsating mixed flow can be used as a flushing not only for flushing marine equipment, but also for flushing extended and branched ship systems.

Keywords: Oscillations, natural oscillation frequency, two-phase flow, pulsator, mixer, flushing of ship systems, intensification

For citation: Elana G. Lebedeva Definition of the main elements of a two-phase Flow Pulsator for flushing ship Systems, Marine Intelligent Technologies. 2024. № 2 part 1, P. 74—81. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.009

Введение

Повышение функциональной надежности, работоспособности и долговечности элементов судовой энергетической установки, оборудования и систем в процессе эксплуатации зависят от степени

чистоты рабочих жидкостей. Чистота рабочих жидкостей зависят от чистоты внутренних поверхностей полостей судовых трубопроводов, устройств, оборудования, механизмов. Перед заполнением судовых систем рабочими жидкостями проводят мероприятия по очистке внутренних

поверхностей судовых систем. Одним из таких процессов является этап технологической промывки.

Промывка судовых систем занимает значительный по времени и трудоемкости процесс на производственном этапе. Мелкие частицы загрязнений вымываются крайне сложно и длительно [1], что объясняется их положением в вязком пристеночном слое [2]. При этом, частицы, находящиеся в невозмущенном пристеночном слое, где силы вязкости преобладают над инерционными, могут оставаться внутри полостей трубопроводов, далее попадать в оборудование и оказывать негативное влияние на дальнейшую надежность оборудования и системы в целом. Результаты промывки судовых систем улучшаются при проведении интенсификационных мероприятий. Например, интенсификация промывки может достигаться применением газожидкостного потока. Однако, данный способ также имеет недостатки, связанные с неустойчивостью потока на большом расстоянии. Газожидкостный поток расслаивается, газ собирается в пузыри, способствует развитию кавитации и т.д. Для создания более устойчивой структуры газожидкостного потока предлагается на него воздействовать различным образом. Так, хорошо зарекомендовал себя метод промывки закрученным двухфазным потоком [3], но данный способ требует применения специального устройства, закручивающего двухфазный поток. Иной способ промывки пульсирующим двухфазным потоком был достаточно исследован в [4]. Использование пульсирующей двухфазной промывки показало хорошие результаты на практике [5]. В [4] не достаточно были рассмотрены некоторые вопросы, например, связанные с конструкцией смесителя и одновременно пульсатора, применяющегося для создания пульсирующего двухфазного потока.

При течении двухфазного потока в протяженных трубопроводах двухфазный поток не устойчив, то есть происходит рост и слияние пузырьков воздуха, с последующим их расслоением. Наличие пузырьков воздуха в воде служит очагами кавитационных зародышей. При попадании двухфазного потока в узкие участки судовых систем возможно развитие кавитации. Основным фактором транспортировки двухфазного потока по трубопроводам и качество промывки является структура двухфазной смеси и ее поведение. Результаты экспериментального исследования структуры двухфазного потока представлено в [6]. Определение режима течения двухфазного потока зависит от соотношения жидкостной и газовой фаз.

Для интенсификации процесса промывки в судовых трубопроводах необходимо достичь устойчивого режима течения смеси без слияния пузырей и последующего ее расслоения.

Согласно исследованиям, проведенных в [4], для соблюдения необходимых условий промывки требуется создание одного из следующих режимов: пузырькового, пенного или эмульсионного. Предпочтительным является пузырьковый режим, так как при этом проявляется флотационный эффект. Данный режим может наблюдаться при соблюдении определенного соотношения фаз и средних скоростей. Кроме этого, на устойчивость режима без расслоения и образования крупных пузырей в потоке

влияет наличие принудительной пульсации определенной частоты. При наличии определенных частот пульсаций в двухфазном потоке в нем будут существовать пузырьки воздуха расчетного диаметра необходимых для осуществления условий промывки внутренних полостей трубопроводов от загрязнений. Данный положительный при промывке эффект определяется резонансными явлениями в системе пузырек – пульсатор.

Как показали исследования [5] объемное воздухо содержание составляет примерно 0,3–0,5 при внутреннем избыточном давлении в трубопроводе порядка 4-5 атмосфер. Средняя скорость гидродинамической промывки достигает 3,5 м/с и еще более возрастает по мере добавления в поток промывочной воды воздуха.

При малом содержании воздуха для создания облегченной модели движения двухфазного потока в канале, предположим, что в двухфазной смеси отсутствует скольжение фаз относительно друг друга. Данные характеристики потока справедливы для гомогенной модели двухфазного потока. Следовательно, для определения основных характеристик пульсатора - смесителя будем исходить из предположения, что скорости водной и воздушной фазы равны друг другу, т. е. воспользуемся гомогенной моделью.

Определение радиуса пузырьков воздуха в потоке воды исходя из условий обеспечения его несущей способности

Воспользуемся статистическими данными приведенные в [1], дающими представление о величине частиц технологических загрязнений. Крупные частицы имеют приведенные диаметры от 0,3 до 3,87 мм, мелкие - менее 0,3 мм. Частицы пыли имеют еще меньшие диаметры, составляющие значения <10 мкм. Большинство технологических загрязнений, вымываемых при промывках, составляют частицы размерами более 0,1 мм. Таким образом, большинство крупных частиц технологических загрязнений, имеют размеры более 0,3 мм.

Насыщенный воздухом поток воды при движении по каналам обладает флотационным эффектом. Данный эффект проявляется в том, что пузырек воздуха в потоке жидкости обладает адгезионными свойствами по отношению к частицам технологических загрязнений. Предметом данного исследования являются трудноудаляемые мелкие частицы загрязнений со стенок каналов, находящиеся в вязком пристеночном слое. Таким образом, необходимо определить радиус пузырька воздуха в потоке воды, имеющего необходимую несущую способность относительно частицы загрязнения соизмеримой с вязким подслоем.

Частицы загрязнений, находящиеся в пристеночной зоне, не вымываемые турбулентным потоком при проведении обычной гидродинамической промывки, имеют габариты соизмеримые с толщиной пристеночной зоны [2]. По данным приведенным в [2] диаметры частиц технологических загрязнений, буквально застрявших в пристеночном слое при средних скоростях промывки соответствующих значениям от 3,0 до 3,5 м/с в промываемых трубах диаметрами от 50 до 150 мм, ограничены значениями до 0,07 - 0,1 мм.

В [2] были рассмотрены различные модели взаимодействия частиц загрязнений и пузырьков воздуха. Пузырек воздуха в первую очередь прилипает к частице загрязнения при этом полностью останавливаясь в потоке, то есть теряя собственную скорость движения до 0. Соотнеся полученные значения размеров частиц загрязнений и толщины пристеночной зоны, определим радиус пузырька воздуха, обладающего подъемной силой на основе флотационной модели.

Пузырек воздуха, прикрепившийся к частице загрязнения, обладает подъемной силой, обусловленной силой Архимеда $F_{арх}$ [Н], приложенной к суммарным объемам частицы и пузырька воздуха. Сила Архимеда противодействует силе тяжести, также приложенной к тяжелой частице $G_{част}$ [Н] и легкой воздуха $G_{возд}$ [Н]. Рассмотрим условие равновесия:

$$F_{арх} \geq G_{част} + G_{возд}$$

В последнем выражении можно пренебречь составляющей, отвечающей за вес воздуха в толще воды в виду малой плотности воздуха:

$$F_{арх} \geq G_{част}$$

Силу Архимеда для частицы и пузырька воздуха определим исходя из их объемов:

$$F_{арх} = \rho' g \frac{4}{3} \pi (R_{част}^3 + R_{возд}^3)$$

Где ρ' - плотность воды в кг/м³, $R_{част}$ и $R_{возд}$ - приведенные радиусы частицы и воздушного пузырька соответственно в м.

Вес частицы определим через объем частицы, как:

$$G_{част} = \rho_{част} g \frac{4}{3} \pi R_{част}^3$$

где $\rho_{част}$ - плотность частицы загрязнения в кг/м³.

Таким образом, получаем соотношение:

$$R_{возд} \geq R_{част} \sqrt[3]{\frac{\rho_{част} - \rho'}{\rho'}}$$

Если в качестве частицы рассматривать тяжелые из видов загрязнений, например стальные частицы загрязнений с плотностью $\rho_{част} = 7850 \text{ кг/м}^3$:

$$R_{возд} \geq 1,9 R_{част} \quad (1)$$

Для мелких частиц, осевших на стенках трубопроводов, соизмеримых с вязким подслоем $R_{част} = \frac{0,07}{2} = 0,035 \text{ мм}$, радиус пузырька воздуха составит $R_{возд} \geq 0,066 \text{ мм}$.

Определение частот собственных колебаний пузырьков воздуха в потоке воды

Радиус пузырька воздуха, движущегося в потоке воды, соответствует частоте собственных колебаний и пульсациям давления в потоке. При этом, пузырек воздуха должен обладать несущей способностью относительно частиц технологических загрязнений [4]. Частота собственных колебаний сферического пузырька воздуха при постоянной температуре [7] определяется, как частота колеблющегося осциллятора по формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho' R_{возд}^3}}, \text{ рад/с}$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения воды [Н/м].

Радиус пузырька газа, соответствует правильной сферической форме осциллятора, находящегося в состоянии равновесия с окружающей его жидкостью.

Круговая частота колебаний связана с частотой собственных колебаний через соотношение [7]:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}, \text{ Гц}$$

Таким образом, можно установить соответствие между радиусом пузырька воздуха в потоке окружающей его воды и колебательным процессом во внешнем потоке:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho' R_{возд}^3}}, \text{ рад/с} \quad (2)$$

При соблюдении условий модели гомогенного потока пузырьки воздуха в потоке воды должны быть мелкими. Кроме этого, необходимо учитывать размеры пузырьков обладающие несущей способностью пузырька воздуха в потоке воды относительно частиц технологических загрязнений.

Данный способ интенсификации промывки имеет направленное воздействие на очень мелкие частицы технологических загрязнений, находящихся на стенке каналов, в так называемом, вязком подслое. Как известно, крупные технологические загрязнения вымываются без особых проблем обычным гидродинамическим промывочным потоком воды в первые часы промывки. Мелкие частицы не попадают в ядро турбулентного потока и представляют особую проблему. На мелкие частицы загрязнений можно воздействовать с целью их выноса в ядро турбулентного потока путем разрушения вязкого подслоя за счет возрастания в нем пульсаций и скоростей.

Таким образом, учитывая выше сказанное, получим на основе уравнения (2) и неравенства (1) необходимую частоту колебаний сферического пузырька воздуха, как осциллятора, осуществляющего транспортную функцию в потоке:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho' (1,9 R_{част})^3}}, \text{ Гц} \quad (3)$$

Необходимая круговая частота колебаний пузырька воздуха в потоке воды в зависимости от радиуса частицы загрязнения представлена в таблице 1 (при плотности воды, соответствующей температуре 20 °C).

Таблица 1.

Круговая частота колебаний пузырька воздуха в потоке воды в зависимости от радиуса частицы загрязнения

Радиус частицы загрязнения $R_{част}$, мм	0,03	0,07	0,3	0,53
Радиус несущего воздушного пузырька $R_{возд}$, мм	0,06	0,13	0,57	1,01
Круговая частота колебаний пузырька воздуха f_0 , Гц	7173	2249	245	104

Таким образом, определена круговая частота колебаний пузырька воздуха в потоке воды, соответствующая частоте дробления пузырьков воздуха определенного радиуса. Данные колеблющиеся пузырьки способны прикрепляться и

осуществлять транспортную функцию по отношению к частицам технологических загрязнений, радиусами меньшими, чем определенными в [1] как крупные частицы технологических загрязнений. Например, для частиц загрязнений меньших 0,3 мм диаметром частота колебаний в потоке, разбивающая сливающиеся пузырьки должна быть больше чем 245 рад/с, при этом радиус пузырька воздуха составит величины, меньшие 0,57 мм.

Так как полученные значения являются критическими для осуществления транспортировки с учетом неравенства (1), то в потоке воды достаточно создать колебания с меньшей частотой, например около 100 Гц. При такой частоте будут преобладать пузырьки воздуха радиусом порядка 1 мм. Пузырьки воздуха такого радиуса могут увлекать за собой в ядро турбулентного потока частицы металлических технологических загрязнений радиусом до 0,53 мм.

Определение условий разрушения пузырьков воздуха в двухфазном потоке

Двухфазный поток является не устойчивым. Он стремится расслоиться на фазовые составляющие. Пузырьки воздуха в потоке воды, попадая в область пониженного давления начинают расти, что приводит к образованию воздушных пробок в потоке, слианию больших пузырей из мелких. В дальнейшем это приводит к росту энергетических потерь, затрачиваемых на транспортировку такого потока по каналам [8].

При движении двухфазного потока по трубопроводам звуковая энергия затухает, происходит падение скорости звука [9]. Данное явление подтверждается многочисленными исследованиями, как теоретическими, так и экспериментальными [10].

Основными причинами гашения энергии звука являются:

- нагрев воздушного пузырька при колебаниях;
- колеблющийся пузырек воздуха сам является излучателем звука;
- образование микровихрений потока воды вокруг колеблющегося пузырька воздуха в следствии вязкости.

Скорость распространения звука в двухфазном потоке зависит от объемной концентрации воздуха φ в воде и от давления в потоке p_1 [10], учитывающей объемное содержание воздуха φ :

$$c = \sqrt{\frac{p_1}{\rho'} \cdot \frac{1}{\varphi(1-\varphi)}}, \text{ м/с.} \quad (4)$$

где p_1 – давление внутри жидкости (воды) в Па; $\varphi = \frac{Q''}{Q_{\text{см}}}$ – объемное содержание воздуха в потоке воды, которое определяется через объемные расходы воздуха Q'' и смеси $Q_{\text{см}} = Q' + Q''$ [м³/с]. Q' – объемный расход воды.

Таким образом, затухание звуковой волны в смешанном потоке воды и воздуха, определяется многими факторами, что приводит к росту пузырей, слианию с соседними пузырями при столкновении и появлению воздушных пробок.

Как показали исследования [11] наибольшим запасом устойчивости сферический пузырек обладает относительно окружающей его воды, при малых его размерах, что является результатом совместного влияния поверхностного натяжения и вязкости жидкости. С уменьшением длины волны и

амплитуды возмущений запас устойчивости значительно повышается из-за возрастания демпфирующих свойств окружающей жидкости в результате вязкости.

Осциллирующий пузырек воздуха в потоке воды при внешнем воздействии на него с такой же частотой колебаний, как его собственные колебания, начинает менять свою конфигурацию, нарушается его равновесие, и это может привести к его дроблению [11] на более мелкие пузырьки.

Полученные рассуждения позволяют предположить, что пузырьки газа, являющиеся осцилляторами и одновременно движущиеся в потоке воды, обеспечиваются условием устойчивого равновесия в потоке воды без слипания и роста, внешним колебательным процессом с частотой колебаний, совпадающей с собственной частотой колебаний пузырьков газа в жидкости.

Определение частот собственных колебаний пульсирующего двухфазного потока

Внешний колебательный процесс в потоке воды, воздействующий на пузырьки газа, обеспечивающий устойчивый пузырьков режим, должен обладать частотой колебаний, соответствующий размерам дробящихся пузырьков газа в потоке воды.

Ранее была определена частота собственных колебаний пузырьков газа по формуле (2). Следовательно частота резонансных колебаний внешнего воздействия, приводящих к дроблению более крупных пузырьков на более мелкие должна быть равна f_0 :

$$f_{\text{рез}} = f_0. \quad (5)$$

В качестве резонансного колебательного процесса, воздействующего и дробящего пузырьки газа в потоке на более мелкие, может использоваться механический, ультразвуковой или гидродинамический пульсаторы, обладающие сходной частотой, представленной в таблице 1.

В качестве пульсатора, как сказано выше, могут применяться устройства, производящие колебания в потоке с периодом $T = \frac{1}{f_0}$. Например, механический пульсатор может представлять собой колебательный поршневой механизм [12], в качестве которого может служить поршневой насос или колеблющаяся мембрана. При рассмотрении подобных механических пульсаторов, становится очевидным, что создание частот колебаний, имеющих нужные значения, затруднено, так как частота колебательного процесса в гидравлической среде будет связана с циклической частотой вращения привода. Так, например, рабочий диапазон частот вращения коленчатого вала поршневых насосов, составляет от 300 до 500 об/мин, что соответствует от 48 до 80 Гц. При этом, в смешанном потоке будут генерироваться пузырьки большего радиуса, чем нужно. При использовании других насосов объемного типа можно получить нужную частоту, но при этом устройство, производящее пульсации не обеспечивает перемешивание и равномерное распределение пузырьков по сечению канала, то есть не является смесителем. Таким образом, необходимо не только устройство, генерирующее необходимые пульсации в потоке, но и обеспечивающее перемешивание в потоке.

Хорошо зарекомендовал для проведения промывки систем летательных аппаратов ультразвук [13]. Ультразвуковой пульсатор, согласно с классификацией акустических волн, должен иметь частоту колебаний более 20 кГц. В потоке промывочной воды ультразвук вызывает рост кавитационных пузырьков [14]. Поэтому, при проведении ультразвуковой очистки внутренних полостей систем, оборудования и аппаратов необходимо учитывать антикоррозионные свойства среды, с возможностью последующей обработки этих поверхностей. Фактор развития кавитации в потоке является ограничивающим, поэтому ультразвуковая промывка водой применяется при низких ультразвуковых частотах, а при наличии в потоке воздуха, эти частоты, очевидно, будут еще более снижаться. Кроме того, колебания такой частоты в смешанном потоке будут производить слишком мелкие пузырьки воздуха, радиусом около 0,03 мм. В результате воздействия ультразвука на двухфазный поток, при соответствующей мощности звуковой волны, можно получить эмульсию, состоящей из двух плохо смешивающихся отдельных сред. Поведение такой эмульсии в качестве промывочной среды требует дополнительного исследования. Поэтому применения ультразвуковой промывки с помощью двухфазной среды является предметом дополнительного исследования.

Рассмотрим устройство, имеющее частоту собственных колебаний в широком диапазоне, в частности от 100 Гц до 7,2 кГц. В качестве гидродинамического пульсатора потока может применяться временное местное сужение канала, представленное на рисунке 1а или устройстве подачи смешанного двухфазного потока в виде последовательно соединенного внезапного сужения и диффузора, рисунок 1б.

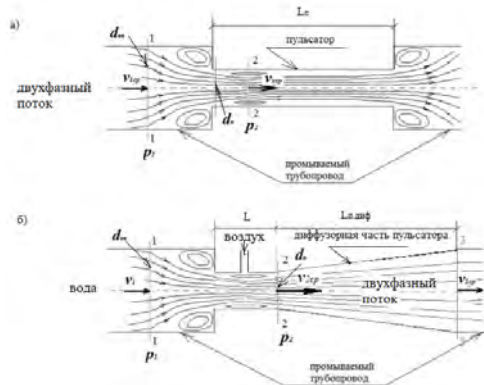


Рис. 1. Схема гидродинамического пульсатора а) пульсатор в виде внезапного сужения и последующего внезапного расширения, б) пульсатор в виде смесителя двухфазного потока

Как установлено ранее (таблица 1), диапазон частот гидродинамического пульсатора должен попадать в значения примерно $100 < f_0 < 7200$ Гц. Данные частоты будут соответствовать пузырькам воздуха существующих в потоке воды радиусами от 0,06 до 1 мм, способными удалять (стальные тяжелые) загрязнения относительного радиуса от 0,03 до 0,53 мм.

Поток воды и воздуха движется со средней скоростью v_{1cp} , рисунок 1а. При попадании

смешанного потока в пульсатор скорость потока v_{2cp} меняется – увеличивается пропорционально отношения квадратов их диаметров, с учетом выполнения уравнения неразрывности (считаем, что средняя плотность потока в сечениях не изменилась):

$$v_{2cp} = v_{1cp} \left(\frac{d_{вн}}{d_н} \right)^2$$

Распространения звуковой волны с происходит с учетом переносного движения двухфазного потока в пульсаторе, движущегося со скоростью v_{2cp} . Таким образом, в движущемся двухфазном потоке, звуковая волна вместе с каждым пузырьком воздуха пройдет примерно расстояние:

$$L_п = (c + v_{2cp})T_п.$$

где $T_п$ – время прохождения данного расстояния $L_п$.

Частота пульсатора определяется исходя из значения периода $T_п$:

$$f_{рез} = \frac{1}{T_п} = \frac{L_п}{c + v_{2cp}}$$

С учетом формул (4) и (5) длина пульсатора может быть определена, как:

$$L_п = \frac{c + v_{2cp}}{f_{рез}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{p_1}{\rho'} \frac{1}{\phi(1-\phi)} + v_{2cp}}{\frac{6\sigma}{\rho'(1,9R_{каст})^3}}} \quad (6)$$

Для определения длины пульсатора зададимся критическими значениями размеров пульсирующих пузырьков воздуха в смеси и ограничимся тремя величинами: $R_{возд} = 0,066; 0,5; 1$ мм, являющимся достаточным для переноса частиц загрязнений.

Для определения скорости звука в двухфазном потоке зададимся массовым расходом воды, различными давлениями в потоке (характерными для промывки судовых систем) и объемным содержанием воздуха. За исходные данные примем, диаметр промываемого трубопровода Ду100, температура воды – 20 °С. Плотность воды $\rho' = 999,23 \text{ кг/м}^3$ [15]. Плотность воздуха ρ'' выбирается также по справочнику физических величин [15] в зависимости от давления в потоке.

Массовый расход смеси $G_{см}$ и средняя скорость смеси v_{1cp} в канале $d_{вн}$ могут быть определены по данным, представленным в статье [16]:

$$G_{см} = G' + G'',$$

где G' , G'' – массовые расходы воды и воздуха.

$$G'' = \frac{kG'}{(1-k)},$$

где $k = \frac{G''}{G_{см}}$ – массовое содержание воздуха в смеси.

$$k = \frac{\rho''}{\rho'} \frac{\phi}{1 - \phi(1 - \frac{\rho''}{\rho'})}.$$

Плотность смеси, определяется в зависимости от объемного содержания воздуха ϕ :

$$\rho_{см} = \rho_{\phi} = (\rho''\phi + \rho'(1 - \phi)).$$

$$v_{1cp} = \frac{G_{см}}{\rho_{см}S}$$

Внутренний диаметр пульсатора ограничен из условия развития кавитации при прохождении двухфазного потока по узкому участку [17]:

$$d_{п} \geq \frac{\sqrt{2}d_{вн}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + 4\frac{\varepsilon^2}{1,5} \left(2\frac{\rho_{см}(p_1 - p_{нп})}{4G'} + 1 \right)}}$$

где $p_{нп}$ – давление насыщенных паров, $\varepsilon = \left(\frac{d_x}{d_n}\right)^2$ – коэффициент сжатия, примем равным 0,53 по данным [18].

В статье [17] определялся диаметр перемычки. В данном случае расчет минимально допустимого диаметра пульсатора из условий обеспечения его бескавитационной работы можно считать аналогичным. Поэтому согласно с расчетами, представленными в [17], диаметр перемычки (пульсатора) должен быть для трубопровода Ду100, промываемого двухфазным потоком не менее 55мм при объемном содержании $\varphi < 0,5$ и давлении $p_1=0,5$ МПа. А при том же объемном содержании воздуха и давлении $p_1=0,2$ МПа диаметр пульсатора уже должен быть не менее 68мм. Поэтому, за диаметр пульсатора возьмем наибольший из представленных с учетом округления до 70мм, так как вряд ли гидродинамическая промывка будет проводиться при более низких давлениях p_1 .

Расход промывочной воды принимаем из условия обеспечения развитого турбулентного потока, средняя скорость которого превышает 3,0 м/с. Для Ду100 массовый расход воды без примеси воздуха составит $G' = 23,53$ кг/с.

При объемном содержании воздуха в потоке $\varphi = 0,3 \div 0,5$, соответствующим результатам эксперимента [5] были получены следующие данные, представленные в таблице 2:

Таблица 2.

Длина гидродинамического пульсатора

Давление в потоке, МПа	0,4		0,5	
Объемное содержание воздуха, φ	0,3	0,5	0,3	0,5
Массовое содержание воздуха, к, %	2,04	4,74	2,54	5,92
Массовый расход смеси	23,58	23,64	23,59	23,67
Скорость смеси в пульсаторе, $v_{ср}$, м/с	8,75	12,25	8,74	12,25
Скорость звука, с, м/с	43,64	40,02	48,83	44,74
Радиус пульсирующего пузырька воздуха $R_{возд} = 1$ мм				
Круговая частота f_0 , Гц	105			
Длина пульсатора, L_n , м	0,45	0,44	0,50	0,48
Радиус пульсирующего пузырька воздуха $R_{возд} = 0,5$ мм				
Круговая частота f_0 , Гц	298			
Длина пульсатора, L_n , м	0,16	0,15	0,18	0,17
Радиус пульсирующего пузырька воздуха $R_{возд} = 0,066$ мм				
Круговая частота f_0 , Гц	6218			
Длина пульсатора, L_n , м	0,077	0,074	0,085	0,081

Таким образом, для обеспечения пульсаций в смешанном потоке воды и воздуха, генерирующих

пузырьки воздуха, радиусом меньше чем 1мм, требуемая длина гидродинамического пульсатора для промывки трубопроводов Ду100, при меньшем диаметре пульсатора $d_n=70$ мм должна быть меньше, чем 0,45мм. Ограничение по минимальной длине пульсатора составляет примерно 0,077мм.

При высокой частоте колебаний порядка 6200Гц, характерной для генерирования мелких воздушных пузырьков воздуха в потоке радиусами около 0,07мм, пульсатор представляет собой местное сопротивление в виде шайбы небольшой протяженности.

При выходе потока из данного местного сопротивления, выполненного в виде внезапного сужения и потом, расширения (рис 1а), образуется торoidalный вихрь, который также производит дополнительную турбулизацию в потоке за счет завихрений, перемещающихся поступательно вдоль оси канала. На образование торoidalного вихря затрачивается дополнительная энергия. Кроме этого, при выходе пульсирующего двухфазного потока из такой перемычки происходит резкий скачок давления, вследствие чего может нарушаться форма пузырьков воздуха. В областях за пульсатором по направлению движения двухфазного потока могут образоваться застойные зоны, в которых могут осесть частицы загрязнений.

Исходя из вышесказанного, следует, что технологические перемычки определенной длины могут работать как дополнительные гидродинамические пульсаторы в потоке, генерирующие колебания в двухфазном потоке. Перемычки могут, как содействовать получаемому промывочному эффекту, так и нивелировать его, что будет соответствовать длинам, большим, чем 0,45м (таблица 2).

Рассмотрение гидродинамического пульсатора, представленного на рисунке 1б, по сравнению с пульсатором, представленном на рисунке 1а показывает ряд преимуществ. Во-первых, после прохождения потоком пульсатора не затрачивается энергия на образование торoidalного вихря. Во-вторых, при малой степени раскрытия диффузора, составляющего 6-8° происходит безотрывное течение смеси в канале [19] и последующий плавный выход потока в промываемый трубопровод. В-третьих, за счет торможения смеси в расширяющемся канале (пульсаторе) происходит небольшой и плавный рост статического давления, что препятствует резкому росту пузырьков воздуха при выходе из диффузора в трубопровод, несмотря на расширение канала. Поэтому максимальную длину диффузорной части пульсатора – смесителя лучше определять по меньшей скорости потока, то есть по средней скорости смеси в промываемом трубопроводе, рассчитываемому по требуемой резонансной частоте:

$$L_{п,диф} = \frac{c + v_{1ср}}{f_{рез}} = 2\pi \frac{c + v_{1ср}}{\sqrt{\frac{6\sigma}{\rho'(1,9R_{част})^3}}}$$

Расчеты, проведенные по последней формуле, применительно к конструкции пульсатора-смесителя (рисунок 1б) показывают незначительное укорочение диффузорной части пульсатора по сравнению с конструкцией, представленной на рисунке 1а. При этом, можно выбрать оптимальное значение исходя из давления при промывке и поставленных целей

(удаления мелких частиц загрязнений, осевших на стенках каналов).

Слишком короткие пульсаторы вызывают ультразвуковые колебания, которые могут стать причиной изменений свойств промывочной среды (формирования эмульсии, вспенивания) и стать причиной повышенной коррозии металла, из которых изготовлены промываемые изделия.

Заключение

Теоретическое определение элементов пульсатора двухфазного потока для осуществления промывки судовых систем установило взаимосвязь длины пульсатора и величины пузырьков воздуха, обеспечивающих транспортную функцию в потоке воды по отношению к загрязнениям.

Проведенный анализ показал:

1. Необходимый диапазон резонансных частот пульсатора, генерирующих в двухфазном потоке пузырьки воздуха нужных радиусов, осуществляющих разрушение пограничного слоя, закрепление и перенос частиц загрязнений в ядро турбулентного потока.
2. Проведена классификация частот пульсаций в гидравлической среде и рассмотрены различные способы создания пульсаций в промывочной среде.
3. Выбран способ создания пульсационных колебаний необходимого диапазона частот.

4. Показано, что технологические перемишки также могут служить источниками пульсаций в потоке. При этом могут производить колебания как в нужном диапазоне, способствующие созданию равновесных условий нахождения пузырька воздуха в потоке воды, а могут и являться причиной их разрушения, в случае, когда длина технологической перемишки будет превышать необходимую.
5. Тороидальный вихрь является причиной дополнительного сопротивления в потоке. Наличие застойных зон перед и после перемишки могут служить дополнительной проблемой, концентрирующей загрязнения в промываемом канале.
6. Нивелирование перечисленных недостатков может быть произведено путем подсоединения к перемишке плавно расширяющегося переходника, осуществляющего безотрывное течение.
7. Обосновано преимущество пульсатора диффузорного типа (рисунок 1б) перед пульсатором, представленным на рисунке 1а, за счет плавного изменения давления при торможении потока.
8. Теоретически определена минимальная и максимальная длина пульсатора в обоих случаях в зависимости от других факторов (давления при промывке, объемном содержании воздуха).

Литература

1. Соловьев Б. В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. Л.: Судостроение, 1977. 75 с
2. Лебедева Е.Г. Обоснование результативности гидродинамической промывки судовых трубопроводов большого диаметра от мелких частиц загрязнений / Судостроение. 2023. № 2 (867). С. 64-66.
3. Аин Е.М., Горобец А.Г., Захаров А.А., Никитин В.С. Технология интенсивной промывки трактов судовых энергоустановок и систем // Судостроение. 2011. № 6 (799). С. 54-58.
4. Лебедева Е. Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дис. канд. техн. наук. СПб., 2012. 169 с.
5. Канаев Д. Н., Лямин П. Л., Лебедева Е. Г., Александров Н. И. Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования // Междунар. науч.-исслед. журн. 2014. № 2-1 (21). С. 93–95.
6. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987. 327 с.
7. Гликман Б.Ф. Нестационарные процессы в пневмогидравлических цепях. М. Машиностроение, 1979 – 256с.
8. Лебедева Е.Г. Определение потерь давления при промывке трубопроводов двухфазным потоком // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 33-38.
9. Гаврилов Л.Р. Содержание свободного газа в жидкости и акустические методы его измерения. Акустический журнал. 1969, т15, №3. С. 321-334.
10. Вилка Чаича М.Б., Юнусова С., Шикин Г.Н. О скорости звука в двухфазной и двухкомпонентной среде // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2011. № 2. С. 161-164.
11. Топорков Д.Ю. Влияние вязкости жидкости на эволюцию малых возмущений сферической формы газового пузырька: дис. канд. физ.-мат. наук. Тюмень., 2006. - 130 с.
12. Щерба В.Е., Нестеренко Г.А., Носов Е.Ю., Павлюченко Е.А., Лысенко Е.А., Виниченко В.С. Влияние частоты вращения на характеристики поршневого насос-компрессора // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 114-118.
13. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л., "Машиностроение" (Ленинград. отделение), 1977. 184 с.
14. Федоров А.А., Кабанов Н.В. Разработка технологии и оборудования для промывки трубопроводов гидротопливных систем самолета с использованием ультразвука // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4-4. С. 880-886.
15. Физические величины. Справочник / Бабичев А.П. Бабушкина Н.А. и др.; Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: «Энергоатомиздат», 1991. – 1232с.
16. Лебедева Е.Г. Определение средней скорости двухфазной смеси, обеспечивающей промывку судовых систем, в зависимости от содержания воздуха в потоке // С-Пб: Судостроение. 2023. № 3 (868). С. 39-42.

17. Лебедева Е.Г. Обеспечение бескавитационного режима при промывке судовых трубопроводов двухфазной смесью. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2023;15(6):1076-1084.
18. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672с.
19. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник. 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

References

1. Solovyov B. V. Cleaning of ship systems from technological pollution. L.: Shipbuilding, 1977. 75 s
2. Lebedeva E.G. Substantiation of the effectiveness of hydrodynamic flushing of large-diameter ship pipelines from small particles of pollution / Shipbuilding. 2023. No. 2 (867). pp. 64-66.
3. Ain E.M., Gorobets A.G., Zakharov A.A., Nikitin V.S. Technology of intensive flushing of paths of ship power plants and systems // Shipbuilding. 2011. No. 6 (799). pp. 54-58.
4. Lebedeva E. G. Intensification of the technology of flushing ship systems with a pulsating two-phase flow: dis. candidate of Technical Sciences. St. Petersburg, 2012. 169 p.
5. Kanaev D. N., Lyamin P. L., Lebedeva E. G., Alexandrov N. I. New means of technological equipment for flushing marine water systems and equipment // International scientific research. Journal 2014. No. 2-1 (21). pp. 93-95.
6. Deich M. E., Filippov G. A. Two-phase flows in elements of thermal power equipment. M.: Energoatomizdat, 1987. 327 p.
7. Glikman B.F. Unsteady processes in pneumohydraulic circuits. M. Mashinostroenie, 1979 – 256с.
8. Lebedeva E.G. Determination of pressure losses during flushing of pipelines with a two-phase flow // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. 2023. No. 3. pp. 33-38.
9. Gavrilov L.R. The content of free gas in a liquid and acoustic methods of its measurement. Acoustic Journal. 1969, t15, No. 3. pp. 321-334.
10. Vilka Chaicha M.B., Yunusova S., Shikin G.N. On the speed of sound in a two-phase and two-component medium // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Mathematics, Computer Science, physics. 2011. No. 2. pp. 161-164.
11. Toporkov D.Yu. The influence of liquid viscosity on the evolution of small perturbations of the spherical shape of a gas bubble: dis. candidate of Physical and Mathematical Sciences. Tyumen., 2006. - 130 p.
12. Shcherba V.E., Nesterenko G.A., Nosov E.Yu., Pavlyuchenko E.A., Lysenko E.A., Vinichenko V.S. The influence of rotational speed on the characteristics of a reciprocating pump compressor // Omsk Scientific Bulletin. 2011. No. 3 (103). pp. 114-118.
13. Keller O.K., Kratys G.S., Lubyanskiy G.D. Ultrasonic cleaning. L., "Mechanical Engineering" (Leningrad. edition), 1977. 184 p.
14. Fedorov A.A., Kabanov N.V. Development of technology and equipment for flushing pipelines of hydrofuel systems of aircraft using ultrasound // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. Vol. 15. No. 4-4. pp. 880-886.
15. Physical quantities. Handbook / Babichev A.P. Babushkina N.A. and others; Ed. Grigorieva I.S., Meilikhova E.Z. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232s.
16. Lebedeva E.G. Determination of the average velocity of a two-phase mixture providing flushing of ship systems, depending on the air content in the stream // S-Pb: Shipbuilding. 2023. No. 3 (868). pp. 39-42.
17. Lebedeva E.G. Providing a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2023;15(6):1076-1084.
18. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. – M.: Mechanical engineering, 1992. – 672s.
19. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. and others. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives: Textbook. 2nd ed., reprint - M.: Mechanical Engineering, 1982. - 423 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лебедева Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения, Институт Судостроения и Морской арктической Техники, Северный Арктический Федеральный Университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 164500, Северодвинск, улица Капитана Воронина, 6а e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Elena G. Lebedeva Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Shipbuilding, Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Engineering, M. V. Lomonosov Northern Arctic Federal University, 6a Kapitan Voronin Street, Severodvinsk, 164500, Russia e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.05.2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 629.5.00

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.010>

Оценка критериев параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей на основе правил классификационных обществ

Герасиди В.В.¹ gerasidi@rambler.ru, Лисаченко А.В.¹ alexx.liss@yandex.ru,
Белый А.А.¹ bel.sasha1999@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе выполнен анализ нормативных документов классификационных обществ по контролю параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей в эксплуатации. Достоинством контроля состояния по сигналам вибрации является не только возможность получения информации о предполагаемом отказе машины к определенному моменту времени и планирования мер по предотвращению этого отказа. В основу анализа входило рассмотрение критериев оценки параметров вибрации и их уровней, для контроля и диагностики выявления неисправностей двигателей, связанных с повышенной вибрацией. В методику экспериментального исследования входило рассмотрение влияния воздействия действующих сил, а также описаны резонансные колебания при изменении частот вращения современных двигателей. Рассмотренные научные труды и опыт авторов, доказывают о необходимости корректировки уровней и мест контроля вибрации на существующих современных двигателях, установленных на различных видах опор и условий эксплуатации. Выполненные исследования позволили объединить и сгруппировать критерии вибрации с учетом рекомендаций заводов изготовителей по контролю и выявить основные диагностические признаки для выявления причин повышенной вибрации двигателей.

Проводимые исследования судовых энергетических установок, на основе применения безразборных методов диагностики морских судов в эксплуатации, лежат в основе системы управления автономных судов.

Ключевые слова: 4-х тактный двигатель, анализ, вибрационные параметры, техническое состояние, опоры, диагностические признаки.

Благодарности: авторы выражают благодарность судовым компаниям Азово-Черноморского побережья за возможность проведения исследований технической эксплуатации двигателей фирмы "Caterpillar".

Для цитирования: Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Белый А.А. Оценка критериев параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей на основе правил классификационных обществ, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 82—89. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.010

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.010>

Assessment of criteria for vibration parameters of marine 4-stroke engines based on the rules of classification societies

Viktor V. Gerasidi¹ gerasidi@rambler.ru, Aleksey V. Lisachenko¹ alexx.liss@yandex.ru, Alexander A. Belyi¹ bel.sasha1999@yandex.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes the regulatory documents of classification societies for the control of vibration parameters of marine 4-stroke engines in operation. The advantage of monitoring the condition by vibration signals is not only the possibility of obtaining information about the expected failure of the machine by a certain point in time and planning measures to prevent this failure. The analysis was based on the consideration of criteria for evaluating vibration parameters and their levels, for monitoring and diagnosing engine malfunctions associated with increased vibration. The methodology of the experimental study included consideration of the influence of the action of acting forces, and also described resonant oscillations when changing the rotational speeds of modern engines. The reviewed scientific works and the experience of the authors prove the need to adjust the levels and places of vibration control on existing modern engines installed on various types of supports and operating conditions. The performed studies made it possible to combine and group vibration criteria taking into account the recommendations of manufacturers for control and to identify the main diagnostic signs to identify the causes of increased vibration of engines. The ongoing research of marine power plants, based on the use of non-selective methods of diagnostics of marine vessels in operation, are the basis of the control system of autonomous vessels.

Key words: 4-stroke engine, analysis, vibration parameters, technical condition, supports, diagnostic signs.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the ship companies of the Azov-Black Sea coast for the opportunity to conduct research on the technical operation of Caterpillar engines.

For citation: Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisahenko, Alexander A. Belyi Assessment of criteria for vibration parameters of marine 4-stroke engines based on the rules of classification societies, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 82—89. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.010

Введение

Мониторинг состояния машин и оборудования является одним из наиболее эффективных способов снижения аварийности и повышения надежности технических систем. Для вращающегося оборудования основным является вибрационный мониторинг, так как в процессе необратимого изменения состояния всегда возникает цепочка дефектов, и, хотя бы один из них, существенным образом, изменяет вибрацию оборудования. Достоинством контроля состояния по сигналам вибрации является не только возможность получения информации о предполагаемом отказе машины к определенному моменту времени и планирования мер по предотвращению этого отказа, но также поступление ценной информации для

последующего планирования и выполнения операций по техническому обслуживанию. Уровень вибрации судовых ДВС относится к числу важнейших технических показателей, определяющих надежность эксплуатации. Повышенная вибрация сопровождается значительными знакопеременными нагрузками на опорные элементы двигателей и может приводить к их износу и разрушению [1].

Объекты экспериментального исследования

На судах Азово-Черноморского побережья установлены 4-х тактные машины среднеоборотные (СОД) и высокооборотные двигатели (ВОД), отвечающих за движение судна и входящих в состав основной и аварийной электростанции, подруливающих устройств и т.д. [13,14].

Таблица 1

Технические данные судовых 4-х тактных двигателей

№	Назначение	Тип	Фирмы	Частота вращения, $n_{кв}$	Мощность N_e , кВт	Ход поршня, см
1	Главные двигатели	СОД	«MAN», «Rolls Royce», «Wärtsilä», «MAK», «Caterpillar», «Cummins», «MTU», «Perkins»	$n_{кв} = var$ изменяется	от 750 до 4000	менее 30 от 30 до 70
		ВОД			от 350 до 2100	менее 20
2	Вспомогательные двигатели	СОД	«MAN», «Rolls Royce», «Wärtsilä», «MAK», «Caterpillar», «Cummins», «MTU», «Perkins»	$n_{кв} = const$, постоянная	от 750 до 4000	менее 30 от 30 до 70
		ВОД			от 50 до 300	менее 20

Из таблицы 1 видно, что 4-х тактные судовые двигатели имеют различный ход поршня и работают с изменяемой или постоянной частотой вращения. В настоящее время, для контроля технического состояния судовых двигателей, на основании указанных норм вибрации, существуют нормативные документы классификационных обществ (правила):

- DNV GL. Rules for classification. Ships. Edition July 2020. Part 6 Additional class notations. Chapter 8 Living and working conditions [2];

- Lloyds Register. Ship Vibration and Noise/ Guidance Notes/ July 2006 [3].
- American Bureau of Shipping. Guidance notes on noise and vibration control for inhabited spaces. September 2017 [4];
- Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД № 2-020101-174. Санкт-Петербург. 2023 [5].

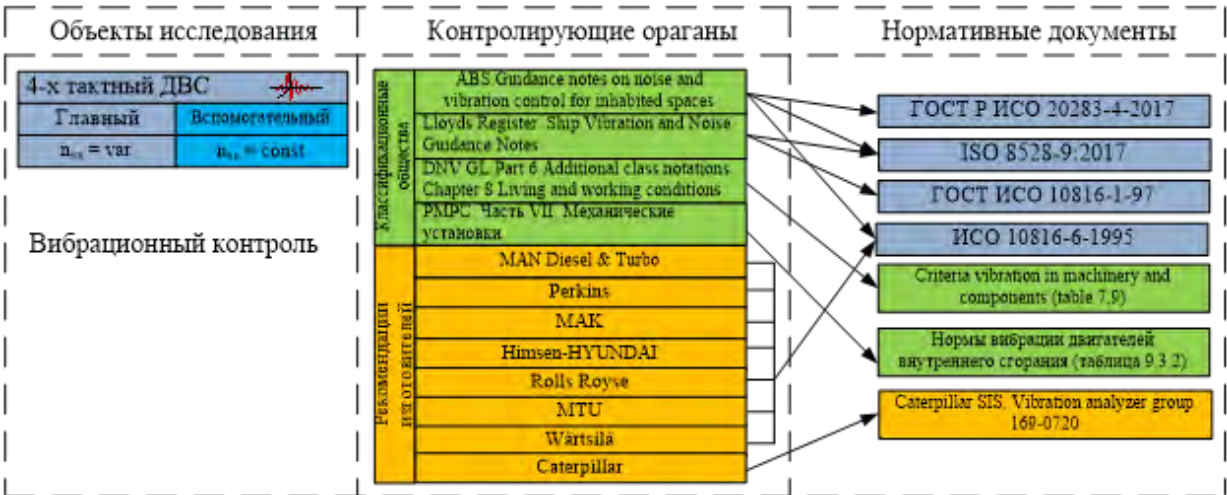


Рис. 1 – Нормативные документы параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей

Из рисунка 1 видно, что часть классификационных обществ ABS и LR ссылаются на ГОСТы [6-9], а DNV GL и PMPC имеют свои документы по нормам вибрации судовых 4-х тактных двигателей [2,5]. В стандартах представлены нормы параметров вибрации в широкой полосе частот, которые можно применить для контроля технического состояния судовых дизелей (таблица 2) [2-9]. Производители судовых двигателей такие, как «Wärtsilä» [10] и «Caterpillar» [11] проводят исследования, в которых ссылаются на ISO стандарты [7,9] и свои методики контроля и диагностики параметров вибрации не только в широкополосных, но и узкополосных частотах для оценки технического состояния двигателей [11]. Крупный производитель судовых ВОД, компания «Caterpillar», в своих сервисных письмах указывает не только контролируемые параметры, но и диагностируемые признаки для выявления причин повышенного уровня вибрации, таких явлений как, резонанс, детонация, несоосность оси движителя и т.д. [12].

Анализ литературных источников показывает, что большая часть трудов и книг посвящена описанию проблем вибрации и их анализу, касательно 2-х тактных малооборотных главных двигателей. Однако в трудах Кузьмина Р.В. ("Техническое состояние и надежность судовых механизмов") представлена оценка технического состояния и расчет частот действующих сил, а также описаны резонансные колебания при изменении частот вращения малооборотных и среднеоборотных двигателей. Анализ вибрации и диагностических признаков современных ВОД, установленных на различных видах опор, выполнено не было. В работе [12] представлены исследования параметров вибрации, которые показывают, что существуют отказы и неисправности двигателей, значения, вибрации которых ниже предельно допустимых норм, указанных в стандарте [9]. В связи с этим, при выполнении анализа вибрации судовых 4-х тактных двигателей, необходимо руководствоваться другими нормативными документами и методиками контроля.

В данной статье будут рассматриваться, и анализироваться критерии параметров вибрации нормативных документов, указанных на рисунке 1, и сравнивать, в качестве примера, параметры вибрации, полученные с судовых 4-х тактных двигателей, имеющих неисправности.

Методика экспериментального исследования

Вибрация механизмов классифицируется как "свободная вибрация", "принудительная вибрация" или "резонансная вибрация". Вибрация судовых двигателей всегда является вынужденной и обычно резонансной. Увеличенная вибрация является результатом некоторой изменяющейся силы, которая либо изменяется больше нормы, или

изменяется с частотой, которая совпадает с собственной частотой какого-либо компонента или системы. В двигателях параметры вибрации связаны с частотой вращения коленчатого вала и её гармониками. При работе четырехтактных двигателей, создаваемые усилия параметров вибрации кратные не только оборотной и её гармониками, но и половинной частоте вращения двигателя на её субгармониках.

Двигатели внутреннего сгорания по своей природе представляют собой систему, подверженную внутренним и внешним воздействиям.

К внутренним воздействиям относятся усилия, создаваемые деталями двигателя, например, кривошипно-шатунный механизм, элементы газораспределительного тракта и т.д. Для "уравновешивания" определенных изменяющихся сил, необходимо установка на двигателе устройств, уменьшающих действия крутильных колебаний (демпфер). На судовых двигателях используются два типа балансировочных устройства. Один тип представляет собой набор валов, вращающихся с удвоенной частотой вращения двигателя для противодействия силам второго порядка. Другой тип - это набор шестерен на обоих концах двигателя, которые имеют заданную величину дисбаланса и вращаются либо на частоте вращения двигателя (первый порядок), либо в два раза больше частоты вращения двигателя (второй порядок) в зависимости от конфигурации двигателя.

К внешним воздействиям относятся усилия, действующие на опоры двигателя. В связи с этим, небольшие двигатели по своей конструкции подвержены внешним воздействиям, которые должны быть изолированы мягкими креплениями. Опыт показал, что большинство проблем с вибрацией на оборудовании «Caterpillar» вызвано дисбалансом вращения. Когда существует проблема с вибрацией и вибрация первого порядка, прежде всего необходимо исследовать дисбаланс вращения. Исключением может быть, если двигатель оснащен балансировочными устройствами первого порядка. При отсутствии резонанса, дисбаланс вызывает постоянный уровень (смещение) вибрации, который является независимо от скорости. Другими словами, это условие достигается, когда двигатель установлен на чрезвычайно мягких пружинах.

В данном обзоре будут рассматриваться критерии для оценки вибрации 4-х тактных двигателей на невращающихся частях подшипниковых узлов в соответствии [2-9].

На рисунке 2 представлены точки контроля параметров вибрации, на примере с V-образным расположением цилиндров 4-х тактных двигателей, в соответствии с ГОСТом [9], на который ссылаются большая часть нормативных документов и рекомендаций заводов изготовителей.

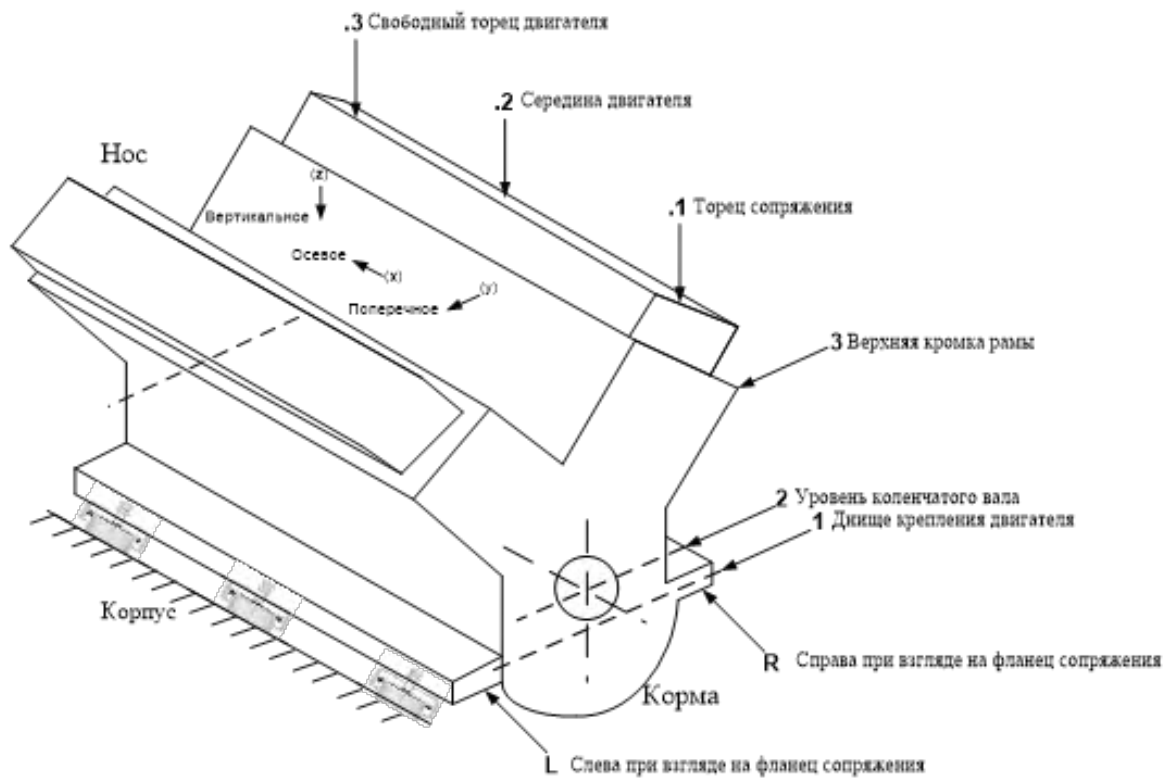


Рис. 2 – Точки контроля измерения вибрации в соответствии [9]

1. Среднеквадратичные значения С.К.З. (R.M.S) скорости $v_{с.к.з.}$ мм/с, измеренные в широком диапазоне частот в соответствии с требованиями [2,6,7,8,9];

2. Среднеквадратичные значения С.К.З. (R.M.S) скорости $v_{с.к.з.}$ мм/с, измеренные в узком диапазоне частот в соответствии с требованиями [2,5];

3. Пиковые значения виброскорости на оборотной частоте вращения $v_{ор}$ Пик (Peak) [2,11].

Таблица 2

Критерии оценки параметров вибрации судовых 4-х тактных двигателей

Ширина диапазона частот, Гц	Тип опор крепления двигателя	Уровни измерений			Точки измерения по длине машины			Обозначение, нормы, классы вибрации	Примечание									
		1	2	3	.1	.2	.3											
Широкополосный диапазон от 10 до 250	Жесткие и мягкие	✓			✓	✓	✓	Широкополосный диапазон $v_{с.к.з.}(10-250)$ <table><tr><td>≤ 18</td><td>≤ 18</td><td>A/B</td></tr><tr><td>≤ 28</td><td>≤ 28</td><td>C</td></tr><tr><td>> 28</td><td>> 45</td><td>D</td></tr></table> Жесткие Мягкие опоры	≤ 18	≤ 18	A/B	≤ 28	≤ 28	C	> 28	> 45	D	В соответствии [6] $n_{кв} = var$
≤ 18	≤ 18	A/B																
≤ 28	≤ 28	C																
> 28	> 45	D																
Широкополосный диапазон от 10 до 1000	Мягкие	✓		✓	✓		✓	Широкополосный диапазон $v_{с.к.з.}(10-250)$ <table><tr><td>≤ 18</td><td>A/B</td></tr><tr><td>≤ 28</td><td>C</td></tr><tr><td>> 28</td><td>D</td></tr></table> Жесткие и мягкие опоры	≤ 18	A/B	≤ 28	C	> 28	D	рекомендации и заводов изготовителе й в соответствии [7] $n_{кв} = const$			
≤ 18	A/B																	
≤ 28	C																	
> 28	D																	
Широкополосный диапазон от 10 до 1000	Мягкие	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Широкополосный диапазон $v_{с.к.з.}(10-1000)$ <table><tr><td>$\leq 2,8$</td><td>A</td></tr><tr><td>$\leq 7,1$</td><td>B</td></tr><tr><td>≤ 18</td><td>C</td></tr><tr><td>> 18</td><td>D</td></tr></table> Мягкие опоры	$\leq 2,8$	A	$\leq 7,1$	B	≤ 18	C	> 18	D	рекомендации и заводов изготовителе й в соответствии [8] $n_{кв} = var$	
$\leq 2,8$	A																	
$\leq 7,1$	B																	
≤ 18	C																	
> 18	D																	
Широкополосный диапазон от 10 до 250		✓	✓	✓	✓	✓	✓	Широкополосный диапазон $v_{с.к.з.}(10-250)$ <table><tr><td>≤ 18</td><td>A/B</td></tr><tr><td>≤ 28</td><td>C</td></tr><tr><td>> 28</td><td>D</td></tr></table> Жесткие и мягкие опоры	≤ 18	A/B	≤ 28	C	> 28	D	рекомендации и заводов изготовителе й в соответствии [9] $n_{кв} = var$			
≤ 18	A/B																	
≤ 28	C																	
> 28	D																	

Широкополосный диапазон от 4 до 200	Жесткие и мягкие	✓			✓	✓	✓	Широкополосный $v_{\text{ср}}(4-200)$ <table><tr><td>≤ 11</td><td>≤ 18</td><td>A / B</td></tr><tr><td>≤ 15</td><td>≤ 25</td><td>C</td></tr><tr><td>> 18</td><td>> 30</td><td>D</td></tr></table> Жесткие Мягкие опоры	≤ 11	≤ 18	A / B	≤ 15	≤ 25	C	> 18	> 30	D	$n_{\text{кв}} = \text{var}$ в соответствии [2]
≤ 11		≤ 18	A / B															
≤ 15		≤ 25	C															
> 18	> 30	D																
Широкополосный диапазон от 4 до 200	Широкополосный диапазон $v_{\text{ср}}(0-250)$ <table><tr><td>≤ 11</td><td>A / B</td></tr><tr><td>≤ 18</td><td>C</td></tr><tr><td>$> 22,5$</td><td>D</td></tr></table> Жесткие и мягкие опоры	≤ 11	A / B	≤ 18	C	$> 22,5$	D	$n_{\text{кв}} = \text{const}$ в соответствии [2]										
≤ 11	A / B																	
≤ 18	C																	
$> 22,5$	D																	
Узкополосный диапазон $v_{0(1)p}$	Узкополосный диапазон $v_{0(1)p}$ <table><tr><td>≤ 10</td><td>A / B</td></tr><tr><td>≤ 10</td><td>C</td></tr><tr><td>> 10</td><td>D</td></tr></table> Жесткие и мягкие опоры	≤ 10	A / B	≤ 10	C	> 10	D											
≤ 10	A / B																	
≤ 10	C																	
> 10	D																	
Узкополосный диапазон среднегеометрически х частот 1/3 полос	Жесткие и мягкие	✓		✓	✓	✓	✓	рисунок 3	в соответствии [5]									
Узкополосный диапазон, пик v_{0p}	Жесткие и мягкие		✓		✓		✓	таблица 3	в соответствии [11]									

Зона А - в эту зону попадает, как правило, вибрация новых машин, вводимых в эксплуатацию. Зона В - машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают пригодными для эксплуатации без ограничения сроков. Зона С - машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают непригодными для длительной непрерывной эксплуатации. Такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ. Зона D - уровни вибрации в данной зоне обычно могут вызывать серьезные повреждения машин [8].

4. Пиковые значения виброскорости на частотах соответствующих оборотной частоте вращения двигателя v_{0p} гармонике $v_{0(2)p}$ и субгармонике $v_{0(0,5)p}$ в соответствии с рекомендациями завода изготовителя фирмы "Caterpillar" [11]. Для анализа

вибрации исследуемых двигателей были выполнены следующие виды обработки сигналов в вертикальном (z), осевом (x) и поперечном (y) направлениях, в местах контроля, представленных на рисунке 2.

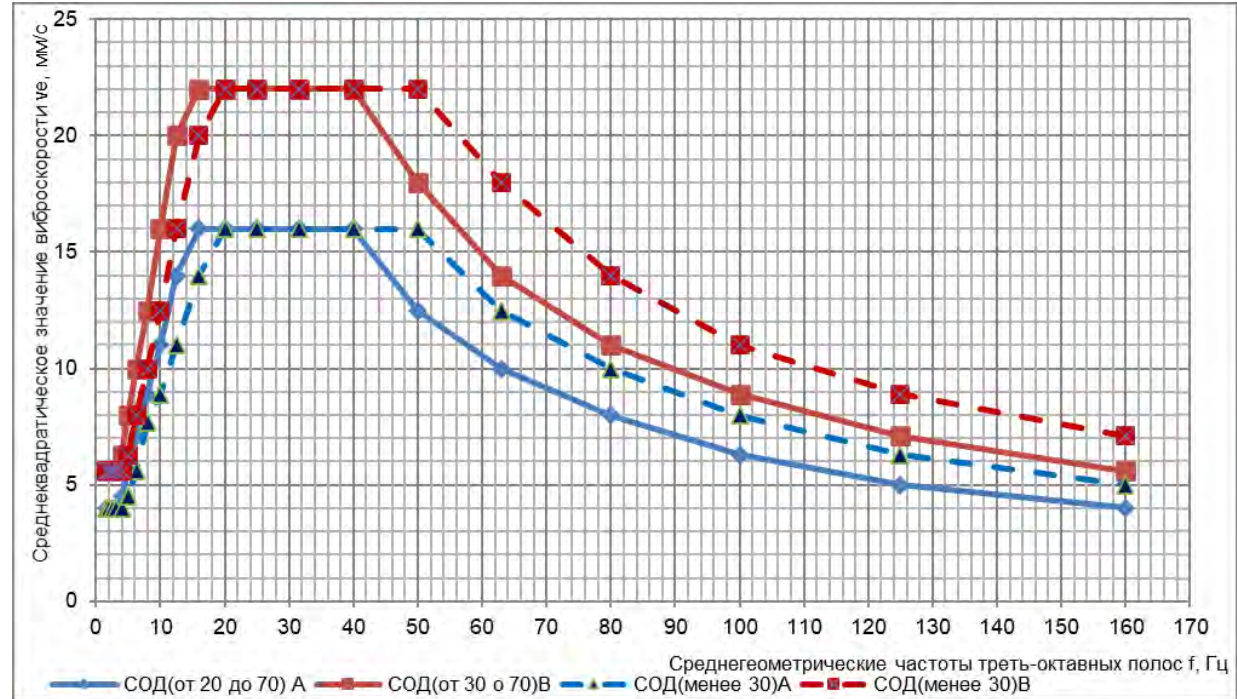


Рис. 3 – Зависимость среднеквадратического значения виброскорости от среднегеометрических частот 1/3 полос СОД [5]

А – состояние механизмов и оборудования после изготовления (постройки судна) или ремонта при вводе в эксплуатацию; В – состояние механизмов и оборудования во время нормальной эксплуатации; С – состояние механизмов и оборудования, при котором требуется проведение технического обслуживания или ремонта [5]

Таблица 3

Диагностические критерии параметров вибрации в соответствии с рекомендациями завода изготовителя [11]

Группа	Диагноз	Причина вибрации	Признаки	Значения, v_{0p} , мм/с
A	Неуравновешенность вращающихся частей коленчатого вала двигателя	дисбаланс	Значения параметров вибрации увеличиваются в несколько раз при увеличении нагрузки на двигатель	Класс вибрации I "хорошее техническое состояние" $v_{0(0.5)p} \leq 4,5$ $v_{0(1)p} \leq 4,5$ $v_{0(2)p} \leq 4,5$
B	Нарушение плавного процесса сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндрах	детонация		
C	Несоосность двигателя и проводного оборудования оси (силы смещения)	несоосность	Значения одного из параметров сильно увеличено в отличии от других параметров вибрации и изменяется в зависимости от нагрузки двигателя	Класс вибрации II "удовлетворительное техническое состояние" $v_{0(0.5)p} \leq 7$ $v_{0(1)p} \leq 7$ $v_{0(2)p} \leq 7$ $v_{0\Sigma_{0.5p}} \leq 35$
D	Ослабление крепление конструкции двигателя к корпусу судна (ненадлежащее закрепление оборудования, опоры)	жесткость конструкции, крепление		
E	Неуравновешенные силы крутильных колебаний коленчатого вала (крутящий момент)	демпфер крутильных колебаний		
F	Возрастающие вынужденные колебания при сближении частоты внешней силы с собственной частотой колебания двигателя	резонанс		Класс вибрации III "проблемы с вибрацией" $v_{0(0.5)p} > 10$ $v_{0(1)p} > 10$ $v_{0(2)p} > 10$ $v_{0\Sigma_{0.5p}} > 35$

Из таблицы 3 видно, что компания Caterpillar представляет более расширенный анализ вибрации, где впервые для рассмотренных нормативных документов, указываются новые группы вибрации, диагностические признаки с нормируемыми значениями и классами вибрации. В качестве обсуждения, можно предложить, принять классификационным обществам такую классификацию зон технического состояния для судовых ВОД. В следующих статьях авторы представят анализ вибрации в течении 10 лет эксплуатации главных ВОД, установленных на судах Азово-Черноморского побережья и обратятся с предложением в классификационные общества принять новые зоны и классы вибрационного состояния при освидетельствовании инспектором Регистра судовых главных ВОД.

Существующие, рассматриваемые нормативные документы, по контролю вибрационного состояния не всегда в нашей практике, при развитой неисправности, превышают предельно-допустимые значения параметров вибрации, полученных в широкой полосе частот. Например, на рисунке 4 представлен спектр виброскорости с неисправной топливной системой и детонацией в одном из цилиндров главного ВОД. Из рисунка 4 видно, что:

- преобладающие по всему спектру пики, соответствуют оборотной частоте вращения двигателя v_{0p} её гармоникам и субгармоникам;
- пиковое значение виброскорости на полуоборотной частоте вращения $v_{0(0.5)p}$ Пик (Peak) двигателя максимальное и равняется 10,2 мм/с;
- во всех рассматриваемых нормативных документах, уровень виброскорости не превышает предельно-допустимых значений, кроме [11].

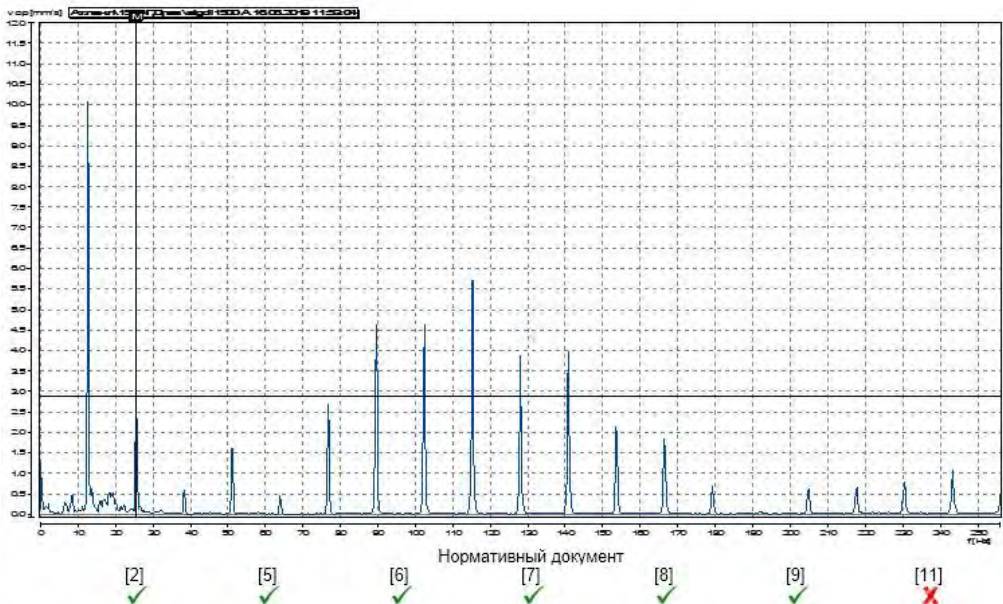


Рис. 4 – Спектр виброскорости в поперечном направлении точки контроля R2.3у главного ВОД мощностью 2100 кВт, установленного на мягких опорах

Заключение

Анализ нормативных документов, используемых классификационными обществами и требованиями заводов изготовителей показывают, что часть из них ссылаются на ГОСТы, которые разрабатывались для отслеживания изменений параметров широкополосной вибрации, чтобы получить общую оценку вибрационного состояния машины.

Большая часть нормативных документов ссылается на ГОСТ [9], однако в трудах [8] и наш опыт, более 10 лет наблюдений, показывают, что уровни вибрации в широкой полосе частот не

подходят для диагностики и не всегда могут превышать предельно-допустимых значений в случае неисправности двигателя с явной выраженным диагнозом и причиной повышенной вибрации.

Значения параметров вибрации в узкополосном спектре, связанных с оборотной частотой двигателя, позволяют более точно диагностировать признаки причин вибрации двигателя.

Рекомендации завода изготовителя фирмы "Caterpillar" являются более подходящими для диагностики и выявления причин, связанных с повышенной вибрацией.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 (ИСО 13373-2:2005) Контроль состояния и диагностика машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации». М.: Стандартиформ, 2019
2. DNV GL. Rules for classification. Ships. Edition July 2020. Part 6 Additional class notations. Chapter 8 Living and working conditions. 2020.
3. Lloyds Register. Ship Vibration and Noise/ Guidance Notes/ July 2006.
4. American Bureau of Shipping. Guidance notes on noise and vibration control for inhabited spaces. September 2017.
5. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД № 2-020101-174. Санкт-Петербург. 2023.
6. ГОСТ Р ИСО 20283-4-2017 Вибрация. Измерения вибрации на судах. Часть 4. Измерения и оценка вибрации судовой пропульсивной установки. Идентичен BS ISO 20283-4:2012+A1:2014. Mechanical vibration. Measurement of vibration on ships. Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery. М.: Стандартиформ, 2019.
7. ГОСТ Р ИСО 8528-9-2021. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. М.: Стандартиформ, 2022.
8. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1998.
9. Международный стандарт ИСО 10816-6-1995. Вибрация – Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях – Часть 6: Машины возвратно-поступательного действия номинальной мощностью свыше 100 кВт. М.: Стандартиформ, 2019.
10. Wärtsilä. Vibration guideline for large diesel engines. Johannes Örn. Mechanical and Production Engineering, Vaasa.
11. Caterpillar service information system. Monitoring and diagnostics system marine propulsion engine of the series CAT3500. SMCS - 1900; 7400; 7450; 7451, 2023.
12. Roger Arévalo Gómez. Measurement and analysis of vibrations - Evaluation of the criteria of acceptance ISO Standard 10816-6 Ship Science & Technology - Vol. 13 - n.º 26 - (39-44) January 2020 - Cartagena (Colombia). DOI: <https://doi.org/10.25043/19098642.196>.
13. Епихин А.И., Игнатенко А.В., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами. Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 1 (98). С. 88-96.
14. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Трапезникова Д.А. Методы оптимизации алгоритмов управления судовыми электроэнергетическими системами с целью повышения качества оптимизации. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 2 (103). С. 76-79.

References

1. GOST R ISO 13373-2-2009 (ISO 13373-2:2005) Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. CHast'2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'tatov izmerenij vibracii [Condition monitoring and diagnostics of machines. Part2. Processing, analysis and presentation of vibration measurement results]. М.: Standartinform, 2019
2. DNV GL. Rules for classification. Ships. Edition July 2020. Part 6 Additional class notations. Chapter 8 Living and working conditions. 2020.
3. Lloyds Register. Ship Vibration and Noise/ Guidance Notes/ July 2006.
4. American Bureau of Shipping. Guidance notes on noise and vibration control for inhabited spaces. September 2017.
5. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. CHast' VII. Mekhanicheskie ustanovki [Rules of classification and construction of sea vessels. Part VII. Mechanical installations]. ND № 2-020101-174. Sankt-Peterburg. 2023.
6. GOST R ISO 20283-4-2017 Vibraciya. Izmereniya vibracii na sudah. CHast' 4. Izmereniya i ocenka vibracii sudovoj propul'sivnoj ustanovki. Identichen BS ISO 20283-4:2012+A1:2014. Mechanical vibration. Measurement of vibration on ships. Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery. М.: Standartinform, 2019.
7. GOST R ISO 8528-9-2021. Elektroagregaty generatornye peremennogo toka s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya. CHast' 9. Izmereniya vibracii i ocenka vibracionnogo sostoyaniya [Alternator electric units driven by an

- internal combustion engine. Part 9. Vibration measurements and evaluation of the vibration state]. M.: Standartinform, 2022.
8. GOST ISO 10816-1-97. Vibraciya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashchayushchihsya chastyah. CHast'I. Obshchie trebovaniya [Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part II. General requirements]. M.: Izdatel'stvo standartov, 1998.
 9. Mezhdunarodnyj standart ISO 10816-6-1995. Vibraciya – Ocenka sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashchayushchihsya chastyah – CHast' 6: Mashiny vozvratno-postupatel'nogo dejstviya nominal'noj moshchnost'yu svyshe 100 kVt [Vibration – Assessment of the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts - Part 6: Reciprocating machines with a rated power of over 100 kW]. M.: Standartinform, 2019.
 10. Wärsilä. Vibration guideline for large diesel engines. Johannes Örn. Mechanical and Production Engineering, Vaasa.
 11. Caterpillar service information system. Monitoring and diagnostics system marine propulsion engine of the seriesCAT3500. SMCS - 1900; 7400; 7450; 7451, 2023.
 12. Roger Arévalo Gómez. Measurement and analysis of vibrations - Evaluation of the criteria of acceptance ISO Standard 10816-6 Ship Science & Technology - Vol. 13 - n.º 26 - (39-44) January 2020 - Cartagena (Colombia). DOI: <https://doi.org/10.25043/19098642.196>.
 13. Epihin A.I., Ignatenko A.V., Studenikin D.E., Hekert E.V. Osnovnye trendy vnedreniya tehnologij iskusstvennogo intellekta v upravlenii morskimi avtonomnymi nadvodnymi sudami [The main trends in the introduction of artificial intelligence technologies in the management of marine autonomous surface vessels]. Jekspluatacija morskogo transporta. 2021. № 1 (98). S. 88-96.
 14. Karakaev A.B., Hekert E.V., Trapeznikova D.A. Metody optimizacii algoritmov upravleniya sudovymi jelektroenergeticheskimi sistemami s cel'ju povyshenija kachestva optimizacii [Methods of optimization of algorithms for controlling ship electric power systems in order to improve the quality of optimization]. Jekspluatacija morskogo transporta. 2022. № 2 (103). S. 76-79.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Лисаченко Алексей Витальевич, аспирант кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Alexey V. Lisahenko, graduate student of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93

Белый Александр Алексеевич, аспирант кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Alexander A. Belyi, graduate student of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 18.03.2024

Научная статья

УДК 629.5.064.083.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.011>

Результаты применения безразборной диагностики судовых вспомогательных механизмов

Сергеев К.О.¹ Sergeevko@mstu.edu.ru¹Мурманский арктический университет

Аннотация. Цель статьи заключается в выяснении эффективности применения методов безразборной диагностики. Приводятся анализ результатов безразборной диагностики судовых технических средств четырех различных по составу и назначения судовых энергетических установок (СЭУ): буровой платформы, ледокола, судна снабжения буровых платформ, судоподъемного дока. Это установки с различным оборудованием: насосами разных типов, вентиляторами, грузовыми лебедками, гидронасосами и гидромоторами. Приводятся применяемые методы диагностирования для определения состояния подшипников качения судовых электродвигателей, генераторов, вентиляторов и насосов. Рассмотрены два метода: анализ спектра огибающей и метод ударных импульсов, пояснено, почему предпочтение отдается методу анализа спектра огибающей. Указаны методы диагностики самих механизмов: насосов, гидромоторов, зубчатого зацепления лебедок, суть которых заключена в сравнении уровня вибрации объекта с нормированием вибрации РМРС (Российский морской регистр судоходства). Приводятся достоинства и недостатки этого метода, рассматриваются альтернативные методы диагностики путем сопоставления узкополосных спектров вибрации, даются ссылки на руководящие документы РМРС. Анализ результатов диагностики оборудования с одной стороны, показал, что достаточно большая часть судового оборудования даже при самом жестком подходе может быть допущена к дальнейшей эксплуатации без ремонта, а с другой стороны эти данные косвенно подтверждают надёжность и достоверность примененных для данного оборудования методов диагностики. Делается вывод об эффективности методов безразборной диагностики для уменьшения затрат на использование судового оборудования с одной стороны и повышение безопасности эксплуатации судовых энергетических установок при проведении регулярной диагностики оборудования. Полученные результаты позволяют уверенно доказать, что применение подхода к техническому использованию по принципу «Ремонт по состоянию» (ремонт по действительному состоянию), так же эффективно и надежно, как и применения метода обслуживания и ремонта по плану и не может понизить эксплуатационную надёжность СЭУ (судовой энергетической установки).

Ключевые слова: безразборная диагностика, судовое оборудование, спектральный анализ, треть октавных спектры, подшипники качения, электродвигатели, метод ударных импульсов, судовые насосы, эксплуатация по состоянию, нормирование вибрации.

Для цитирования: Сергеев К.О. Результаты применения безразборной диагностики судовых вспомогательных механизмов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 90—96. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.011

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.011>

Results of diagnostics-in-place application for ship auxiliary mechanisms

Konstantin O. Sergeev¹ Sergeevko@mstu.edu.ru¹Murmansk Arctic University, Russian Federation

Abstract. The article aims to clarify the effectiveness of using the diagnostics-in-place methods. It provides the analysis of the results of ship machinery diagnostics in-place of four ship power plants (SPP) installed on a drilling platform, an icebreaker, a drilling platform supply vessel, and a ship-lifting dock. These installations have different equipment: pumps of various types, fans, cargo winches, hydraulic pumps, and hydraulic motors. The diagnostic methods to determine the condition of rolling bearings of marine electric motors, generators, fans, and pumps are given. Two methods, such as envelope spectrum analysis and shock pulse method, are considered; and it is explained why the preference is given to the envelope spectrum analysis method. The authors specify the diagnostics methods for pumps, hydraulic motors, and winch gearing. The essence of the methods is to compare the vibration level of the object with the vibration normalization of RMRS (Russian Maritime Register of Shipping). The advantages and disadvantages of these methods are provided. The alternative diagnostic methods are considered by comparing narrow-band vibration spectra; references to the RMRS guidance documents are given. Analysis of the equipment diagnostics results showed that a large part of the ship's equipment, even with the most demanding approach, can be allowed for further operation without repair. These data indirectly confirm the accuracy and reliability of the applied diagnostic methods. The conclusion is made about the effectiveness of diagnostics-in-place methods to reduce the cost of using ship equipment and increase the safety of ship power plant operation when carrying out regular equipment diagnostics. The results obtained prove that the "predictive maintenance" (maintenance on the actual state) is as efficient and reliable as the "preventive maintenance" (maintenance and repair on the schedule) and cannot reduce the operational reliability of SPP (ship power plant).

Keywords: diagnostics-in-place, ship equipment, spectral analysis, third-octave spectrum, rolling bearings, electric motors, shock pulse method, marine pumps, predictive maintenance operation, vibration normalization

For citation: Konstantin O. Sergeev, Results of diagnostics-in-place application for ship auxiliary mechanisms. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 90—96. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.011

Введение

Основным современным направлением эксплуатации судовых технических средств является техническое обслуживание их по состоянию. Техническое обслуживание по состоянию не возможно без применения средств безработной диагностики. По данным фирмы Wärtsilä техническое обслуживание по состоянию применяют приблизительно 12% судовладельцев, хотя экономия при использовании ремонта по состоянию судовых технических средств может по данным ЦНИИМФ составлять до 20-25% . [4].

Судовая техника включает в себя механизмы и агрегаты, различающиеся как по конструкции, так и по принципу действия. Существует множество методов диагностики, с помощью которых можно определить техническое состояние механизмов. Так, в литературе [1;2] представлены методы диагностирования роторного оборудования путем анализа спектра огибающей вибросигнала, а также приведена методика расчета основных частот вибрации, необходимых для диагностики. В монографии [3] предложены методы диагностики и основные принципы нормирования вибрации в связи с техническим состоянием механизмов. К сожалению, эти принципы в основном ориентированы на береговое энергетическое оборудование. В справочнике [5] рассмотрены методы и средства технической диагностики судовых технических устройств и конструкций, в том числе методы вибрационной диагностики. Работа [16] посвящена применению программ для вибродиагностики, но прежде всего для определения технического состояния небольших планетарных редукторов.

Для диагностики могут применяться и нормы вибрации, приведенные в правилах РМРС (Российский морской регистр судоходства) и стандарт ИСО 2372. Но нормы РМРС и нормы, рекомендованные ИСО 2372 разработаны исходя из нормирования третьоктавных спектров и общего уровня виброскорости (стандарт) и не всегда подходят для задач диагностики, особенно в части прогнозирования остаточного ресурса.

Изложенные в приведенных источниках методики для диагностики оборудования, как правило, основываются на контроле виброактивности механизмов и соответствия ее различным техническим состояниям, но не содержат примеров конкретного определения технического состояния. В литературе редко встречаются результаты применения методик диагностики для конкретных объектов, за исключением [6;15;16].

Поэтому актуальным является анализ результатов применения диагностики для судового оборудования, не только с позиции эффективности его применения для снижения затрат на эксплуатацию, но и для проверки достоверности применяемых методик диагностики.

Цель статьи – проанализировать опыт вибродиагностики вспомогательных механизмов

различных типов и попытаться определить эффективность различных методов диагностики для применения концепции эксплуатации «по состоянию» («Predictive maintenance»).

В работе были поставлены следующие задачи:

- для подтверждения эффективности перечисленных ниже методов диагностики выяснить в первом приближении количество оборудования, которому можно позволить продолжить работу без ремонта или с минимальными затратами на ремонт;
- по результатам диагностики определять степень пригодности различных типов механизмов (насосов, гидромоторов, редукторов и т.п.) к переводу на ремонт «по состоянию»;
- по результатам диагностики выяснить, достаточен ли ресурс судового оборудования для допуска его к дальнейшей эксплуатации без проведения планового ремонта.

Далее будут приведены методы и методики диагностики, которые использовались при проведении работ, приведены результаты диагностики и сделаны выводы по полученным результатам ее применения для судового оборудования.

Применяемые методы и методики технической диагностики

Для определения эффективности и целесообразности, подтверждения надежности и достоверности применяемых методов диагностики с одной стороны экономической эффективности с другой стороны анализировались результаты применения диагностики для судовых механизмов совершенно разных типов судовых энергетических установок: энергетической установки буровой платформы, судна снабжения буровых платформ, ледокола и плавучего дока.

Перечисленные судовые энергетические установки эксплуатируются совершенно в различных условиях. Кроме того, для анализа использовались различные механизмы, входящие в состав этих установок: электродвигатели, насосы разных типов, вентиляторы, гидромоторы и грузовые лебедки.

Для определения технического состояния перечисленного оборудования использовались различные методы диагностики. Так для диагностики подшипников электродвигателей, генераторов применялся только метод, основанный на контроле спектра огибающей вибрации подшипниковых узлов. Этот метод широко описан в литературе [2;3;5]. Другой распространенный метод диагностики подшипников качения основан на контроле ударных импульсов. [5]

Но практическое использование показало, что метод ударных импульсов при определении состояния подшипников шестеренных насосов, масляных насосов других типов и подшипников их электропривода может привести к ошибочному диагнозу из-за наводок со стороны самого насоса, особенно при работе на холодном масле.

Для диагностики насосов водяных осушительных, пожарных, балластных использовался, как метод

анализа огибающей, так и сравнение нормами РМРС. Кроме того, для водяных центробежных насосов контролировалось давление при закрытом нагнетательном клапане. Диагностическим

параметром в этом случае служила величина развиваемого давления, которая не должна была сильно отличаться от паспортных значений.

Таблица 1

Применяемые методы диагностики для судового оборудования

Наименование механизма	Метод диагностики
Подшипники электродвигателей и генераторов	Анализ спектра огибающей и контроль диагностических параметров подшипников
Вентиляторы	Анализ спектра огибающей. Контроль превышения третьоктавных норм РМРС
Насосы водяные, том числе пожарные, систем охлаждения главных двигателей, балластно – осушительные	Контроль превышения третьоктавных норм РМРС, анализ спектра огибающей, определение максимального развиваемого давления. Анализ прямого узкополосного спектра в случае обнаружения превышения нормы для выяснения конкретного дефекта
Насосы топливоподкачивающие, систем смазки, рулевых машин и винта регулируемого шага, гидромоторы разного назначения.	Сравнение спектров вибрации с третьоктавными нормами РМРС, анализ узкополосного спектра в диапазоне до 5 кГц, сравнение полученного узкополосного спектра с аналогичными насосами.
Редуктора лебедок	Анализ спектра огибающей, анализ прямого узкополосного спектра, сравнение его со спектром подобных агрегатов.

Для насосов топливоподкачивающих, насосов систем смазки, насосов рулевых машин и винта регулируемого шага, гидромоторов использовался метод диагностики сравнением с нормами РМРС и анализа прямого узкополосного спектра вибрации в диапазоне до 5 кГц. По узкополосному спектру определялось наличие модуляции зубовых частот частотами вращения и их высших гармоник. Спектры насосов сравнивались с друг другом и с однотипными насосами с других судов.

У вентиляторов проводилась диагностика методом огибающей и сравнения с нормами РМРС, так как отложения на лопастях могли приводить к повышенной вибрации и существенному снижению ресурса агрегата.

У редукторов лебедок анализировался спектр огибающей для контроля подшипников и прямой узкополосный спектр в диапазоне до 5 кГц для определения наличия модуляции зубовых частот частотами вращения и контроля высших гармоник зубцовых частот.

По этим признакам, исходя из опыта диагностики подобных агрегатов, определялись возможные износы и поломки зубьев.

Применяемые методы диагностики сведены в таблицу 1.

Пример диагностики на основе норм РМРС приведен на рис. 1. Применяется норма по ускорению (РМРС допускает и такое использование норм) и третьоктавный спектр вибрации водяного насоса. [10]

Не смотря на то, что РМРС использует нормирование вибрации в третьоктавных полосах спектра виброускорения и виброскорости всего до 500 Гц рассматривается спектр виброускорения до 5000 Гц для выявления возможных на насосах кавитационных явлений. При использовании узкополосного спектра использовались рекомендации из [7].

К сожалению, нормы, приведенные в правилах РМРС для редуктора ГТЗА, не подходят для диагностики таких не больших редукторов.

Воздушные компрессора диагностировались путем сравнения их вибрации с нормами РМРС,

применением метода огибающей для контроля подшипников. Определялось и давление создаваемое компрессором.

Необходимо отметить, что анализ прямого узкополосного спектра использовался для всех без исключения механизмов, если обнаруживалось превышение норм РМРС.

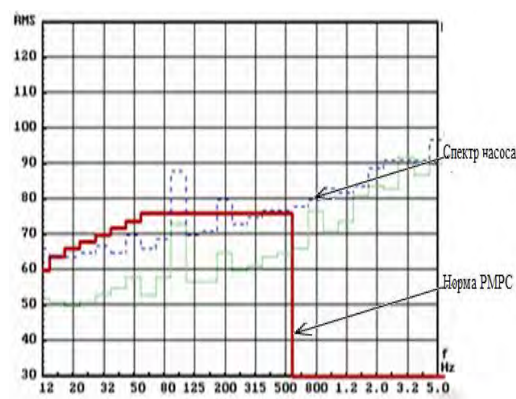


Рис. 1. Спектр вибрации водяного насоса в сравнении с нормой РМРС

Результаты диагностики

Результаты диагностики оборудования представлены на рис 2 - 9. На каждом графике показано общее количество механизмов, для которых проводилась диагностика, количество допущенных к эксплуатации агрегатов и нуждающихся в разборке или дополнительном контроле. Следует отметить, что при определении исправных механизмов использовались очень жесткие критерии, учитывались положения приведенные в [11]. Даже при наличии только выраженных зарождающихся дефектов или не значительного превышения нормы РМРС оборудование выбраковывалось. Все работы по диагностике выполнялись перед ежегодным освидетельствованием судна РМРС.

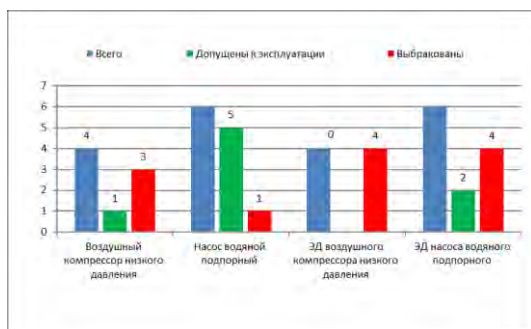


Рис.2. Результаты диагностики механизмов буровой платформы

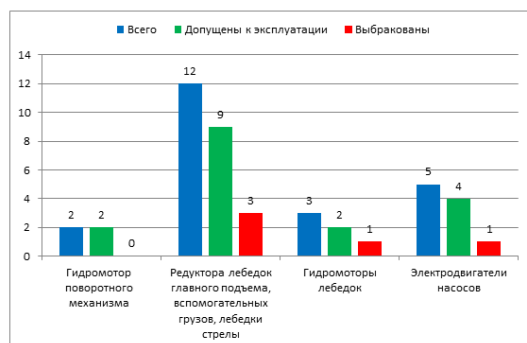


Рис.3. Результаты диагностики механизмов буровой платформы (продолжение)

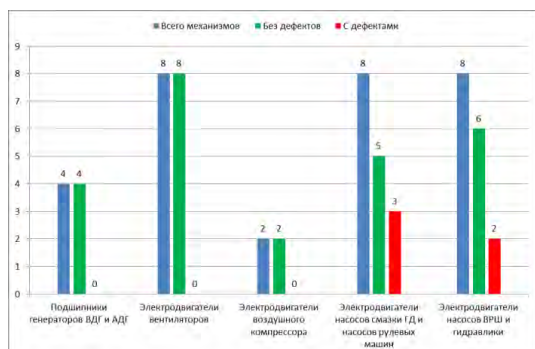


Рис.4. Результаты диагностики механизмов судна снабженца буровых платформ

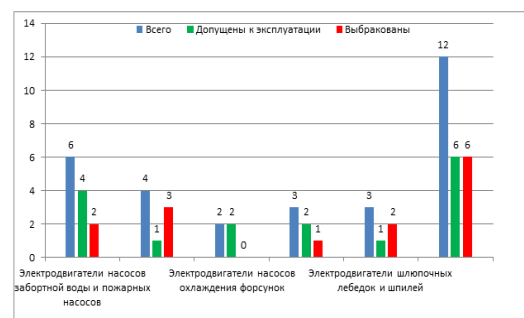


Рис.5. Результаты диагностики механизмов судна снабженца буровых платформ (продолжение).



Рис.6. Результаты контроля вспомогательных механизмов ледокола

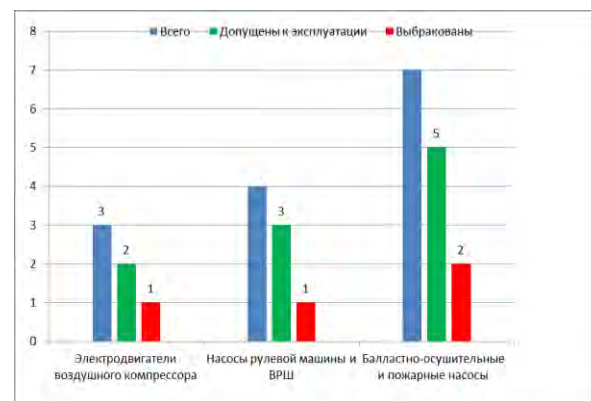


Рис.7. Результаты контроля вспомогательных механизмов ледокола



Рис.8. Результаты контроля вспомогательных механизмов плавдока

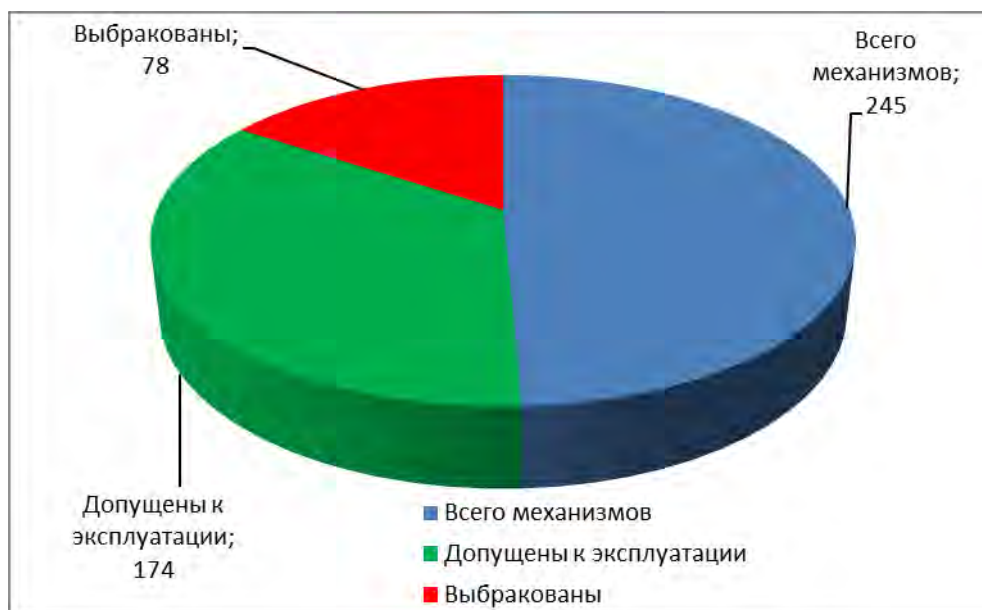


Рис.9. Общие результаты диагностики СЭУ всех исследуемых судов

Как видно из приведенных графиков, на всех проверенных судах были получены разные результаты, что объясняется различием механизмов, условий эксплуатации и разными наработками. Тем не менее, на обобщенном графике видно, что почти 70% механизмов можно допустить к дальнейшей эксплуатации, по крайней мере, до следующего ежегодного освидетельствования.

Представители РМРС утвердили результаты диагностики, и механизмы были допущены к дальнейшей эксплуатации без ремонта, что подтверждает правильность выбора методов диагностики и достаточную эксплуатационную надежность различных типов судовых механизмов, позволяющую передавать их на эксплуатацию с «ремонт по состоянию».

Следует отметить, что за последующий год эксплуатации проверенных механизмов у них не было отмечено ни одной неисправности, за исключением течей сальников на насосах, которые были оперативно устранены экипажами.

Существенно, что даже механизмы, отбракованные по результатам измерений, вполне работоспособны. Их отнесение к «неисправным» обусловлено лишь обеспечением необходимого запаса прочности, поскольку судно эксплуатируется в море (где дефект может иметь самые серьезные последствия), и следующее освидетельствование будет проведено не ранее, чем через год. Судовое оборудование отличается от берегового тем, что его нельзя эксплуатировать до тех пор, пока дефект не станет критическим. Поэтому диагностика всегда проводится по самым строгим правилам.

Однако можно спрогнозировать оставшийся ресурс или, правильнее сказать, срок до следующих диагностических работ. В этом случае наиболее подходящим методом будет использование модели прогнозирования, обоснование которой приведено в [8]. Сложность будет в том, что оборудование имеет узлы с разной надежностью.

Кроме того, построение диагностической модели требует анализа виброакустических характеристик

различных узлов и построения различных зависимостей, что выходит за рамки данной статьи. Несомненно, применение методов прогнозирования, приведенных в [12;13], позволяет существенно уточнить прогноз, но их применение мало реально в судовой практике, где оборудование с незначительными дефектами может быть выбраковано. Оценить остаточный ресурс не допущенного к эксплуатации оборудования невозможно, поскольку оно находится в ремонте. Другой проблемой будет обоснование достоверности прогноза перед РМРС и сложность разработки критериев, приведенных в указанных работах.

Есть еще один аспект необходимости использования диагностики судового оборудования. В ходе диагностики могут быть выявлены скрытые и не проявившиеся дефекты оборудования. Судовой персонал обычно обнаруживает дефект тогда, когда он становится критическим. Использование инструментальных методов диагностики помогает избежать внезапных выходов оборудования из строя. Таким, повышается надежность если не отдельных агрегатов, то всего судна в целом.

Заключение

Полученные результаты применения безразборной диагностики судовых механизмов позволяют сделать следующие выводы:

➤ Анализ результатов диагностики доказал правомерность используемых методов и их информативность для различных типов судовых агрегатов и оборудования: подшипниковых узлов электродвигателей, генераторов, насосов, вентиляторов, грузовых лебедок. Сочетание контроля вибрационной активности по стандартам РМРС (для эталонов, построенных по третьоктавным спектрам виброскорости и виброускорений) с использованием анализа огибающей и использованием узкополосных спектров при превышении норм показало свою эффективность, поскольку в среднем около 70% проверенного оборудования было допущено к дальнейшей

эксплуатации и отказов при его дальнейшем использовании не зафиксировано.

➤ Анализ полученных результатов диагностирования показал, что большая часть судового оборудования разных типов имеет достаточный ресурс, что позволяет использовать оборудование по результатам диагностики, без ремонта, даже несмотря на то, что оно проработало длительный период со времени предыдущего освидетельствования.

➤ Полученные результаты определения

технического состояния различных механизмов на судах разных типов подтверждают возможность реальной передачи судового оборудования на ремонт «по состоянию»;

➤ Дальнейшая разработка методик диагностики судового оборудования должна быть направлена с одной стороны на увеличение достоверности получаемых результатов с другой на разработку методов позволяющих прогнозировать остаточный ресурс и тем самым более грамотно планировать проведение ремонтных работ.

Литература

1. Баркова, Н.А. Борисов А.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частот вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза. - Изд. центр СПбГМТУ, г. СПб, 2009г.- 111с.
2. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Текст] : учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. - Санкт-Петербург : Севзапучцентр, 2013. - 158 с.
3. Вибродиагностика: Моногр. / Розенберг Г. Ш., Мадорский Е. З., Голуб Е. С. и др.; Под ред. Г.Ш. Розенберга. - СПб. : ПЭИПК, 2003. - 284 с.
4. Возницкий, И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания, том 2 : учеб. для вузов / И. В. Возницкий, А.С. Пунда. - СПб. : Моркнига, 2008. - 468 с.
5. Голуб, Е. С. Диагностирование судовых технических средств / Е. С. Голуб, Е. З. Мадорский., Г. Ш. Розенберг. - Москва : Транспорт, 1993. - 150 с.
6. Дорошев А.Ю., Вибродиагностика технического состояния подшипников электрических машин карьерных экскаваторов. / А.Ю. Дорошев, Д.Н. Николайчук // в сборнике Освоение георесурсов дальнего востока России и стран Азиатско – тихоокеанского региона. Горный информационно - аналитический бюллетень № 12, Выпуск 2016.
7. Лукьянов А.В., Лебедева Н.Ю. Повышение точности анализа вибрации по спектру// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2. С. 32–37.
8. Методы прогнозирования технического состояния судового энергетического оборудования Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А., Хруцкий О.В Труды Крыловского государственного научного центра. Т. 386, № 4. 2018 Transactions of the Krylov State Research Centre. Vol. 386, no. 4. 2018
9. Мэтью Д., Альфредсон Р. Применение вибрационного анализа для контроля технического состояния подшипников качения: Пер. с англ.- Конструирование и технология машиностроения.- М.: Мир, 1984 г.- т.106, №3.- с.100-108.
10. Правила классификации и постройки морских судов часть VII «Механические установки» НД:2-020101-114 - Санкт-Петербург : Рос. мор. регистр судоходства, 2019. - 81 с. : ил. - (Российский морской регистр судоходства). - ISBN 978-5-89331-119-8 : 7552-00.
11. Приложения к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации ФАУ «Российский морской регистр судоходства» 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная.
12. Равин, А.А. Прогнозирование технического состояния оборудования. Монография /А.А. Равин, О.В. Хруцкий - Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, ISBN 978-3-659-53832-2, 2014.- 141 с.
13. Равин А. А., Хруцкий О. В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник АГТУ. Сер. : Морская техника и технология. 2018. № 1.
14. Scheffer, C. and Girdhar, P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Oxford: IDC Technologies, Newnes, 2004. ISBN 0 7506 6275 1
15. Sergeev, K. O. The results of bearings diagnostics of ship electric motors and generators / K. O. Sergeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 560, Number 1.
16. Hasanli, Sh.M. Vibro-acoustic diagnostics of rotary type machines and mechanisms / Sh.M. Hasanli, R.N. Mehdizadeh, E.K. Huseynov., S.A. Seyedzadeh Sabunci // Second international conference on technical and physical problems in power engineering. - Tabriz-Iran : 6-8 september 2004.- p. 509

References

1. Barkova N, Borisov A (2009) Vibration diagnostics of machines and equipment. Calculation of the main vibration frequencies of machine components, parameters of measuring equipment and practical expertise. Publishing Centre of Saint Petersburg State Marine Technical University, SPb.
2. Barkov A, Barkova N, Azovtsev A (2013) Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration [Text] : teaching guide. Sevzapuchzentr, Saint Petersburg.
3. Rosenberg G, Madorsky E, Golub E et al. (2003) Vibrodiagnostics. PEIPK, SPb.
4. Voznitsky I, Punda I (2008) Ship internal combustion engines, Vol. 2. Coursebook for universities. Morkniga, SPb.
5. Golub E, Madorsky E, Rozenberg G (1993) Ship technical equipment diagnostics. Transport, Moscow.
6. Doroshev A, Nikolaychuk D (2016) Vibration diagnostics of technical condition of mining excavators electric machine bearings. Development of geo - resources of the Russian Far East and the countries of the Asia - Pacific region. Mining information and analytical bulletin 12.
7. Lukyanov A, Lebedeva N (2011) Improving the accuracy of vibration analysis on the spectrum. J Sovremennye Technology. Sistemny analiz. Modelirovanie 2: 32-37.

8. Myasnikov Yu, Nikitin V, Ravin A, Khrutsky O (2018) Methods of forecasting the technical condition of ship power equipment. Transactions of the Krylov State Research Centre 386 (4).
9. Mathew, J, Alfredson, R (1984) Technical condition monitoring of rolling bearings using vibration analysis. J Konstruirovaniye i Tekhnologiya Mashinostroeniya. 106 (3): 100-108.
10. Rules for the classification and construction of marine vessels. Part VII "Propulsion plants" ND:2-020101-114. St. Petersburg : Russian Maritime Register of Shipping, 2019.
11. Annexes to the Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service FAI "Russian Maritime Register of Shipping" 8, Dvortsovaya Naberezhnaya, 191186, St. Petersburg, Russian Federation.
12. Ravin A, Khrutskii O (2014) Forecasting the technical condition of equipment. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing.
13. Ravin A, Khrutskii O (2018) Engineering methods for predicting the residual life of equipment. J Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series Marine engineering and technology 1.
14. Scheffer C and Girdhar P (2004) Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Oxford: IDC Technologies, Newnes.
15. Sergeev K (2019) The results of bearings diagnostics of ship electric motors and generators. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 560 (1):012168. doi:10.1088/1757-899X/560/1/012168.
16. Hasanli Sh, Mehdizadeh R, Huseynov E, Seyedzadeh Sabunci SA (2004) Vibro-acoustic diagnostics of rotary type machines and mechanisms. Second international conference on technical and physical problems in power engineering. Tabriz-Iran : 6-8 September.

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

Сергеев Константин Олегович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок и судоремонта, Мурманский арктический университет, 183010, Мурманск, ул. Спортивная, 13, e-mail: Sergeevko@mstu.edu.ru

Konstantin O. Sergeev, Ph.D. (Eng), assistant professor, head of department, «Department of Ship Energy Installations and Ship Repair», Murmansk Arctic University, Sportivnaya 13 St. Murmansk, 183010, Russian Federation, e-mail: Sergeevko@mstu.edu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.05.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.05.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 17.05.2023.

Научная статья

УДК 629.5.00

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.012>

Анализ вибрационных параметров винторулевых колонок фирмы Schottel марки SRP 300/226 морского буксира

Герасиди В.В.¹ gerasidi@rambler.ru, Лисаченко А.В.¹ alexx.liss@yandex.ru,
Модина М.А.¹ marishamodina@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе представлены вибрационные и теплотехнические испытания судовых главных винторулевых колонок различного технического состояния, выполненные на характерных режимах в эксплуатации и в условиях сухого дока. Достоинством контроля состояния по сигналам вибрации является не только возможность получения информации о предполагаемом отказе машины к определенному моменту времени, но и планирования мер по предотвращению этого отказа. В основу анализа входило рассмотрение критериев оценки параметров вибрации элементов главных винторулевых колонок и выявление неисправности, влияющей на повышения температуры масла и самопроизвольного поворота одной из колонки морского буксира. Выполненные исследования позволили выявить основные характерные частоты вибрации, влияющие на техническое состояние элементов главных винторулевых колонок морских буксиров. Приведенный пример измерения вибрации в условиях сухого дока доказал необходимость периодического применения безразборного вибрационного метода контроля для прогнозирования отказа или неисправности узлов подводных частей главных винторулевых колонок морских буксиров.

Проводимые исследования судовых энергетических установок, на основе применения безразборных методов диагностики морских судов в эксплуатации, лежат в основе системы управления автономных судов.

Ключевые слова: винторулевая колонка, анализ, вибрационные параметры, техническое состояние, неисправность, сухой док.

Благодарности: авторы выражают благодарность судовым компаниям Азово-Черноморского побережья за возможность проведения исследований технической эксплуатации двигателей фирмы "Caterpillar".

Для цитирования: Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Модина М.А. Анализ вибрационных параметров винторулевых колонок фирмы Schottel марки SRP 300/226 морского буксира, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 97—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.012>

Analysis of vibration parameters of Schottel screw steering columns of the SRP 300/226 marine tug

Viktor V. Gerasidi¹ gerasidi@rambler.ru, Aleksey V. Lisachenko¹ alexx.liss@yandex.ru,
Marina A. Modina¹ marishamodina@yandex.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Russian Federation

Abstract. The work presents vibration and thermal engineering tests of ship's main rotor columns of various technical conditions, performed under typical operating conditions and in dry dock conditions. The advantage of monitoring the condition by vibration signals is not only the possibility of obtaining information about the expected failure of the machine at a certain point in time, but also planning measures to prevent this failure. The analysis was based on the consideration of criteria for evaluating the vibration parameters of the elements of the main propeller columns and the identification of a malfunction affecting oil temperature increases and spontaneous rotation of one of the columns of a marine tugboat. The performed studies allowed us to identify the main characteristic vibration frequencies that affect the technical condition of the elements of the main propeller columns of marine tugs. The given example of vibration measurement in dry dock conditions proved the need for periodic use of a non-disassembled vibration control method to predict failure or malfunction of nodes of underwater parts of the main propeller columns of marine tugs.

The ongoing research of marine power plants, based on the application of non-selective methods of diagnostics of marine vessels in operation, is the basis of the control system of autonomous vessels.

Key words: screw steering column, analysis, vibration parameters, technical condition, malfunction, dry dock.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the ship companies of the Azov-Black Sea coast for the opportunity to conduct research on the technical operation of Caterpillar engines.

For citation: Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisachenko, Marina A. Modina. Analysis of vibration parameters of Schottel screw steering columns of the SRP 300/226 marine tug, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 97—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.012

Введение

В настоящее время, на морских судах в качестве движителей установлены главные

винторулевые колонки (ГВПК) различных фирм Schottel, Aqamaster, Roll Roys и т.д. По данным РМРС с 1993 года и по сей день на судах вспомогательного флота установлены различные типы движителей

(рисунок 1). Например, на морских буксирах Азово-черноморского побережья установлены около 62 единиц, большая часть из них наработала более 15 лет.

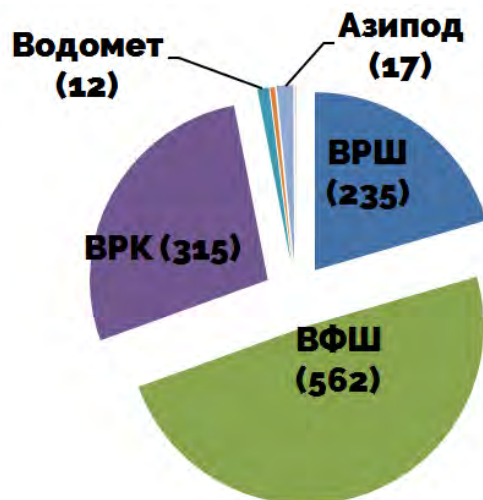


Рис. 1. Круговая гистограмма распределения типов движителей на судах под надзором РМРС с 1993 по 2023 гг.

Анализ технической эксплуатации показывает, что ГВРК имеют большие наработки, и в процессе технической эксплуатации происходят неисправности связанные с разрушением зубьев шестерни и подшипников вала зубчатой передачи [1-5].

На рисунке 2,3 представлены неисправности элементов ГВРК морских буксиров [2-5].

Анализ литературных источников показывает, что существуют научные работы, посвященные исследованиям и изучением механизма усталостного разрушения зубьев к которым относятся: плохая конструкция зубчатых колес, неправильная сборка или несоосность зубчатых колес, перегрузки, непреднамеренное повышение напряжения или поверхностные дефекты в критических зонах, а также использование неправильных материалов и термообработки [2-5].

В трудах [6,7] представлен опыт эксплуатации главных винторулевых колонок судов Азово-Черноморского побережья в течение 25 лет эксплуатации. Представлены отказы элементов ГВРК и разработаны методические аспекты теплотехнического, трибологического и вибрационного безразборного контроля в эксплуатации, которые вошли в основу требованиям инспектора РС [8]. В трудах [9,10] представлен анализ возможного применения современных технологий при эксплуатации судовых технических средств.

Применяя систему мониторинга, можно продлить период между разборками ГВРК для инспектора РС от 10 до 12,5 лет и, таким образом, сократить расходы судовладельца при проведении освидетельствований судна. Введение на судах системы мониторинга состояния СТС позволит судовладельцу сократить эксплуатационные расходы на ремонт СТС до 40%.

В связи с этим, разработка методики безразборного контроля элементов ГВРК морских судов является актуальной задачей.

Объектом исследования являются главные винторулевые колонки типа SRP 300/226 фирмы «Schottel» левого и правого борта морского буксира наработка, которых составила на момент исследования 40 тыс. часов. На ГВРК правого борта была выполнена полностью переборка, включая замену всех подшипников валов и проверкой зазоров в зубчатой передаче. На ГВРК левого борта, из действий по ремонту, в течение 20 лет эксплуатации, выполнялись только замена уплотнительных колец и масла по регламенту.

Методические аспекты экспериментального исследования

Фирмы-изготовители не приводят никаких данных о ресурсе деталей и узлов ГВРК и никак не нормируют показатели технического состояния, кроме рекомендаций о своевременной замене масла и уплотнений элементов ВРК через установленный гарантийный срок службы. Срок службы подшипников устанавливается по данным фирмы-изготовителя подшипников. Срок зубчатых пар фирмой-изготовителем не ограничивается. В процессе эксплуатации ВРК, фирма-изготовитель предусматривает контроль только за температурой смазочного масла и рекомендует проведение плановых осмотров и ремонтов.

Этот вид контроля дает возможность зафиксировать начальное техническое состояние ГВРК и отследить его изменение в процессе эксплуатации. Этот вид диагностики дает возможность обнаружить дефекты подвижных (вращающихся) элементов на этапе их зарождения и проследить за их развитием. На основе таких наблюдений (при условии их регулярности и периодичности) возможна оценка технического состояния ГВРК и прогнозирование состояния на определенный период эксплуатации.

Достоинствами вибрационного метода контроля является [6,7,11]:

- высокая оперативность получения результатов измерений (общая оценка технического состояния может занять от 30 минут до 1 часа непосредственно на борту судна);
- возможность определения места возникновения дефекта;
- возможность определения дефекта на этапе его возникновения, когда другими методами этого сделать невозможно;
- возможность наблюдения за развитием дефекта и недопущения достижения им критических величин и, как следствие, аварийного выхода ГВРК из строя;
- составление прогноза по изменению технического состояния на определенный период, что позволяет своевременно и качественно подготовиться к проведению ремонтных работ, сократить сроки и стоимость ремонта.
- сравнительно невысокая стоимость и мобильность приборного обеспечения методов;
- возможность получения данных о состоянии не только ВРК, но и связанных с ним механизмов, элементов корпуса и т.д.

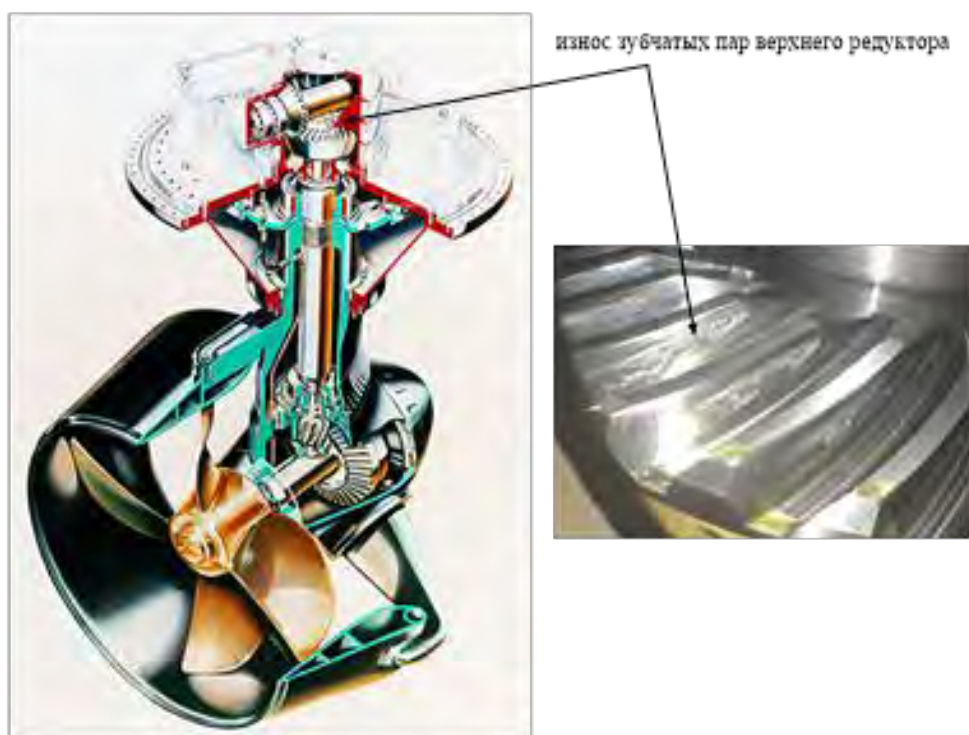


Рис. 2. Износ зубчатых пар верхнего редуктора ГВРК1 фирмы «Schottel»/«Siemens» морского парома [8]

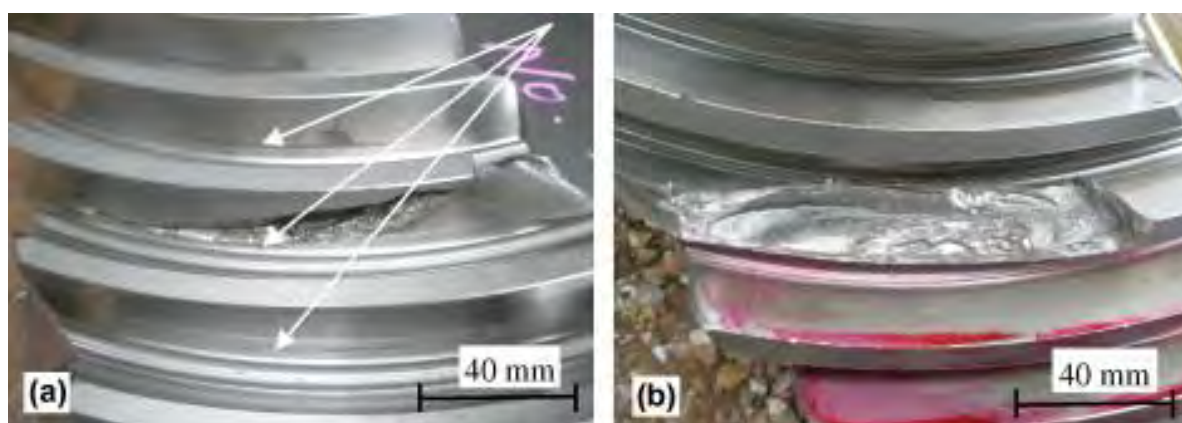


Рис. 3. Сломанное коническое зубчатое колесо ГВРК морского буксира [2-5]

По спектру вибрации можно определить ряд неисправностей как обще механических, так и специфических для редукторов и зубчатых

зацеплений. К неисправностям ГВРК морских судов относят [5,6,7,11]:

1. Расцентровка гребного вала и редуктора: проявляется наведенная вибрация на редуктор от гребного винта, связанная как с плохой центровкой, так и с качеством балансировки собственного гребного винта и его обтеканием потоком воды.

2. Неуравновешенность рабочих колес и шестерен появляется на частотах вращения рабочих колес и шестерен.

3. Износ или повреждения ведущей или ведомой шестерни или колеса: появлением боковых частот.

4. Повреждение подшипников, задевания, недостаточное крепление редуктора к фундаменту, изгиб и бой вала, неисправности муфты.

5. Повреждения маслоагрегата и его привода.

Методика экспериментального исследования вибрационных параметров ГВРК включает:

- расчет основных частот и параметров вибрации рабочих элементов;
- анализ значений параметров вибрации согласно нормативных документов.

В таблице 1 и на рисунке 4,5 представлены основные частоты вибрации рабочих элементов и места установки датчиков вибрации ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel».

Контроль выполнен измерительными средствами:

– анализатор вибрации: Vibro Vision-2, заводской номер 029. Свидетельство об утверждении типа средств измерений С-ВЛК/25-10-2022/196921823 действительно до 24.10.2024;

– тепловизор фирмы Testo 872, Германия, Be su Testo, 2019, серийный номер 62090154. Протокол калибровки, 5137, 23.10.2019.

Критериями, принятыми для оценки вибрации контроля технического состояния, были выполнены

следующие виды обработки вибрационных сигналов в вертикальном (Z), осевом (X) и поперечном (Y) направлениях значения виброскорости v_0 . Пик на рабочих частотах элементов ГВРК и их гармонический ряд [12,13].

Основные причины появления гармоник и субгармоник на рабочих частотах механизма являются [11]:

– дисбаланс, вибрация неуравновешенного ротора;

– изгиб вала, несоосность валов;

– проворот подшипникового кольца на валу или в корпусе;

– наличие зазоров, повышенной податливости деталей и опор, иногда повышенная податливость, зазоры в узлах.

Из таблицы 1 видны основные характерные рабочие частоты и их значения для анализа вибрации элементов ГВРК морских буксиров на различных режимах эксплуатации. Из рисунка 4 видны основные элементы принципиальной схемы с указанием рабочих частот вибрации ГВРК. Например, на промежуточном валу находятся два подшипника, соединение верхнего и нижнего редукторов происходит через шлицевое соединение; движение колонки приводится от двигателя через приводной вал, на котором находятся два подшипника; а за разворот колонки отвечает приводной вал от гидромотора. Из рисунка 5 видно, что проведение экспериментальных исследований влияния параметров вибрации на техническое состояние элементов ГВРК морского буксира выполнялись в эксплуатации на различных режимах и в условиях сухого дока, вращения винта колонки осуществлялось на воздухе.

Таблица 1

Основные частоты вибрации рабочих элементов ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel»

Рабочие частоты вибрации	Обозначение	Формула	Параметр	Режим работы ГД, мин ⁻¹		
				750	1100	1300
Основная частота вибрации ведущего вала, Гц		$f_o = n_o / 60$	v_{po}	12,50	18,33	21,67
Частота вибрации верхнего редуктора, Гц		$f_{ep} = f_o \cdot z_1$	v_{per}	225,00	330,00	390,00
Частота вибрации промежуточного вала, Гц		$f_{np} = n_g / (60 \cdot i_g)$	v_{npr}	9,33	13,68	16,17
Частота вибрации нижнего редуктора, Гц		$f_{nr} = f_{np} \cdot z_3$	v_{npr}	177,24	259,95	307,21
Частота вибрации вала винта, Гц		$f_{es} = n_g / (60 \cdot i_g \cdot i_n)$	v_{es}	4,66	6,84	8,08
Лопастная частота вибрации, Гц		$f_l = f_{es} \cdot Z_l$	v_{pl}	18,66	27,36	32,34
где: n_o – частота вращения двигателя, мин ⁻¹ ; $i_g=1,34$ – передаточное отношение верхнего редуктора; $i_n=2,0$ – передаточное отношение нижнего редуктора; $z_1=16$, $z_2=26$ – число зубьев шестерни и колеса верхнего редуктора; $z_3=19$, $z_4=38$ – число зубьев шестерни и колеса нижнего редуктора; $Z_l=4$ – число лопастей винта						

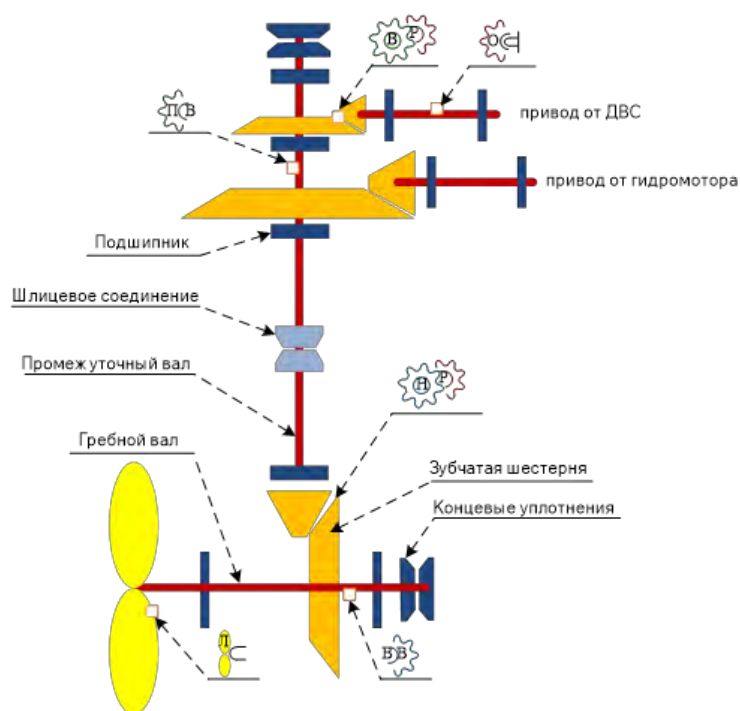


Рис. 4. Принципиальная схема с указанием рабочих частот вибрации элементов ГВРК

а)



б)



Рис. 5. Место установки датчиков вибрации на ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel» правого и левого борта морского буксира в а) процессе эксплуатации; б) сухом доке

Результаты исследования

Ранее, в 2004 году, выполнялись измерения вибрации после переборки исследуемых ГВРК левого и правого борта морского буксира. Эти проводимые измерения были взяты для сравнительного анализа параметров вибрации в процессе эксплуатации ГВРК. В таблице 2

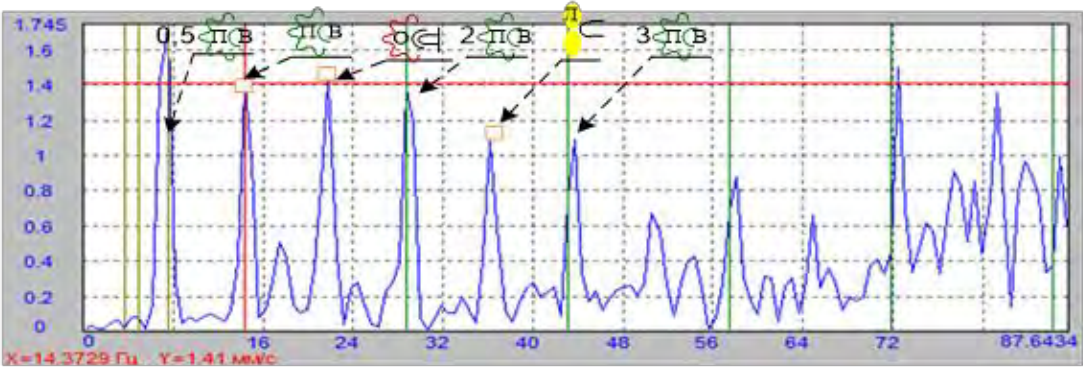
представлены вибрационные параметры, которые были выполнены в 2004 году до и после переборки колонок левого и правого борта. После 20 лет работы (наработка составила 25 тыс. часов), в 2024 году, на ГВРК правого борта был выполнен капитальный ремонт с заменой всех подшипников и инспекцией зубьев шестерен редукторов, а на ГВРК левого борта выполнялись работы только по замене масла.

Таблица 2 – Параметры вибрации в точке 1у в поперечном направлении рабочих элементов ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel», полученных после переборки в 2004 году и в настоящее время.

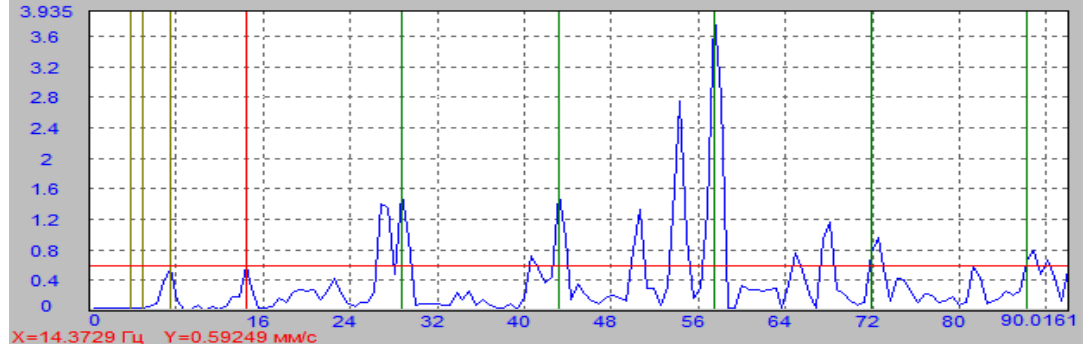
Таблица 2
Параметры вибрации в точке 1у рабочих элементов ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel» полученных после переборки в 2004 году и в настоящее время

Параметр вибрации	Режим работы ГД, мин ⁻¹															
	750			1100				1300 110								
	2004 (до и после переборки)		2024	2004(до и после переборки)		2024	2004(до и после переборки)			2024						
Правый борт																
v_{p0}	-	-	0,4		1,4 6	1,96	2,9			0,1	1,2		1,42			
$v_{pвр}$	-	-	0,5		2,1	2,9	2,8			0,1	0,74		1,9			
$v_{pпр}$	-	-	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	0,2	0,55	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	$2f_{опр}$	$3f_{опр}$	0,1	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	$2f_{опр}$
			1,4	0,3			1,4	1,1	2,7	0,9		1,1	1,7	1,4	1,3	1,1
$v_{pнр}$	-	-	0,2		0,1	0,1	0,5			0,1	0,2		0,4			
$v_{вв}$	-	-	0,3				0,4						0,65			
$v_{рл}$	-	-	$f_{ол}$	$f_{ол}$	$2f_{ол}$			2,7					$f_{ол}$	$2f_{ол}$	$3f_{ол}$	
			0,4	2,8	3,5			0,9	1,3	0,9						
Левый борт																
v_{p0}	-	-	1,2		0,7 9	0,76	2,5			0,8 2	0,23		1,1			
$v_{pвр}$	-	-	0,4		0,8 9	0,2	1,4			0,7	0,3		1			
$v_{pпр}$	-	-	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	0,4 2	0,32	0,8			0,4	0,3	$0,5f_{опр}$	$f_{опр}$	$2f_{опр}$	$3f_{опр}$	
			1,6	0,6								0,5	1,5	1,5	3,7	
$v_{pнр}$	-	-	1,4		0,2	0,31	0,5			0,1	0,2		0,3			
$v_{вв}$	-	-	0,6				0,8						0,55			
$v_{рл}$	-	-	2,1				1,8					$f_{ол}$	$2f_{ол}$			
							1,4	2,7								

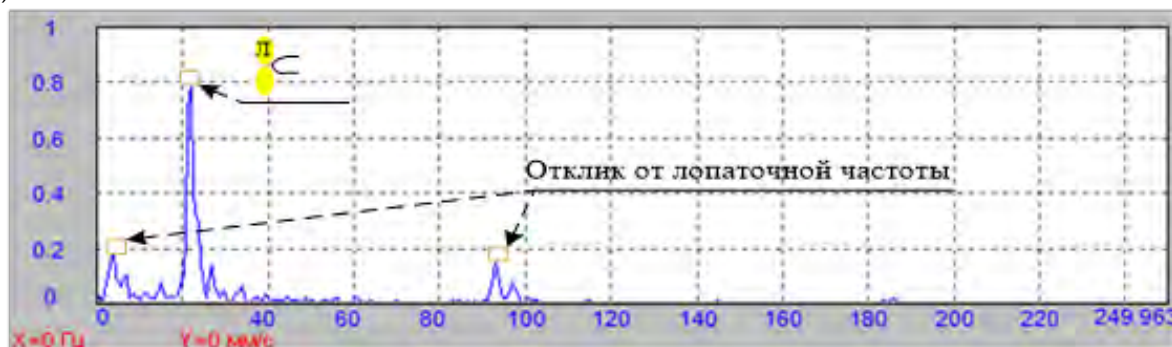
а)



б)



в)



а)

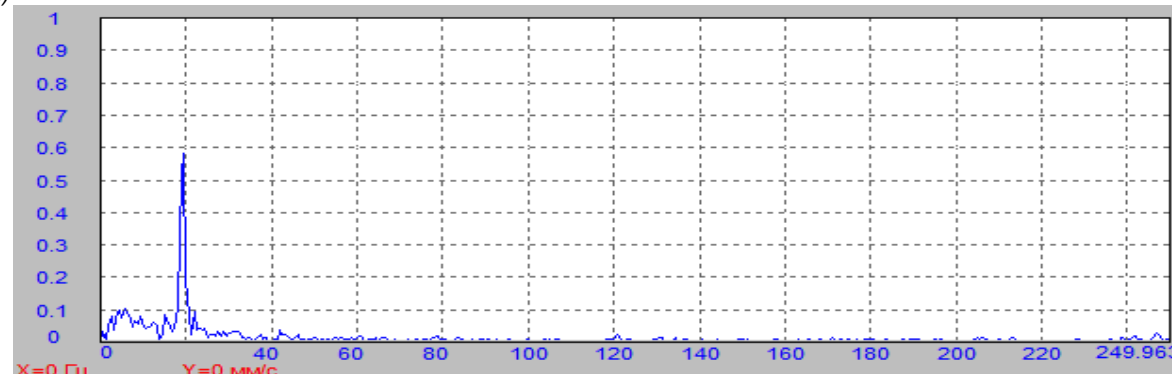


Рис. 6. Спектр виброскорости ГВРК

а,б) в точке 1Y при нагрузке главного двигателя левого и правого борта 1300 мин^{-1} ; в,г) в точке 4Y обороты главного двигателя в сухом доке

Из таблицы 2 видно, что

– в 2004 году: на режиме 750 мин^{-1} замеры не выполнялись, на остальных режимах уровни вибрации не имеют высоких значений, а максимальное составляет на частоте вращения ведущего вала двигателя. На повышенные значения виброскорости, по-видимому, влияет соединение двигателя с ГВРК карданными валами [7,8];

– в 2024 году: на всех режимах уровни вибрации не имеют высоких значений. Однако если провести анализ гармонических составляющих основных характерных частот ГВРК то видно, например, на режиме 1300 мин^{-1} на частоте промежуточного вала ГВРК обоих бортов, начиная с субгармоники до второй гармоники, составляют для: ГВРК правого борта – $1,7/1,4/1,3/1,1 \text{ мм/с}$ (рисунок 6,а); ГВРК левого борта $0,5/1,5/1,5/3,7 \text{ мм/с}$ (рисунок 6,б), это говорит о наличии несоосности и/или наличии увеличенных зазоров зацепления вала. Отличием значений между ГВРК левого и правого бортов является высокое значение субгармоники, которая показывает, наличие дефекта ГВРК правого борта, а у ГВРК левого борта - значения меньше, но

2-ая гармоника больше, это говорит только о начале развития дефекта.

– значения виброскорости на характерных режимах работы элементов ГВРК левого и правого борта, примерно, одинаковые и не превышают предельно-допустимых норм в соответствии [14,15].

Из рисунка 6в,г видно, что отличием спектров виброскорости правого и левого борта ГВРК являются увеличенные значения виброскорости на лопаточной частоте на ГВРК правого борта, а также появляются два пика на частоте нижнего редуктора и конструктивной низкой частоте. В соответствии [11], для судовых движителей влияет число лопастей гребного винта (3 и более), часто на этих частотах проявляется наведенная вибрация на редуктор от гребного винта, связанная как с плохой центровкой, так и с качеством балансировки собственного гребного винта и его обтекания потоком воды. Все это может приводить к повышенной температуре масла ГВРК в эксплуатации (рисунок 7). Из рисунка 7 видно, что температура масла ГВРК правого борта выше на 20°C по сравнению с ГВРК левого борта на частоте вращения 1300 мин^{-1} главного двигателя морского буксира.

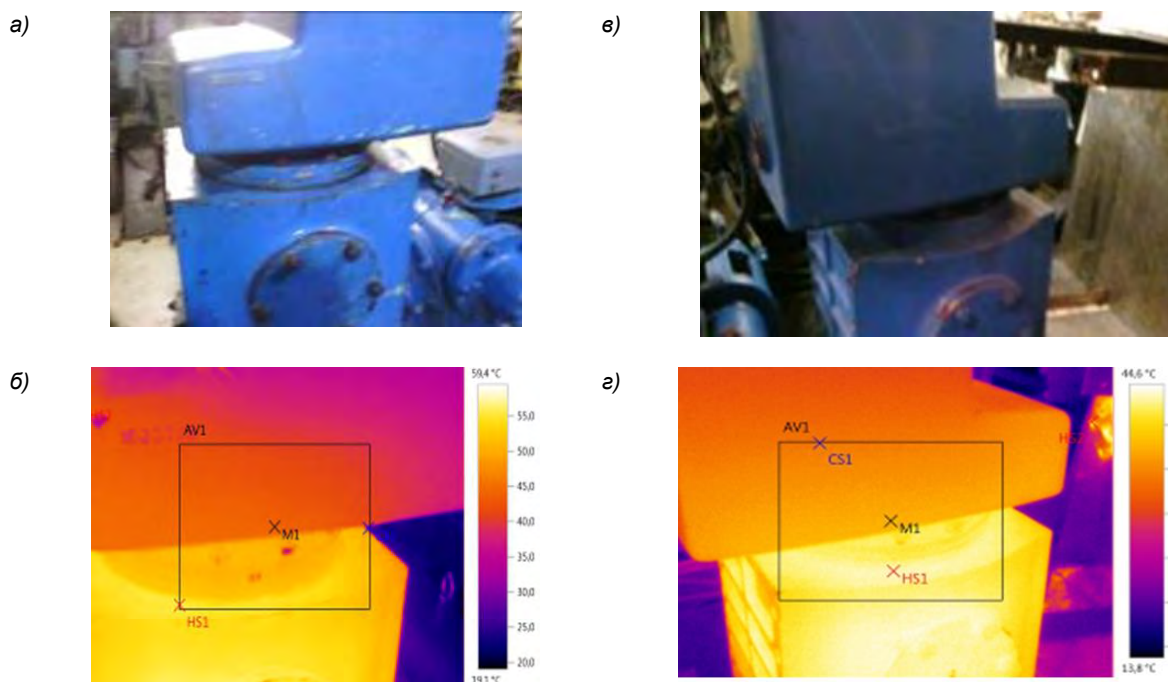


Рис. 7. Фото теплового рассеивания элементов ГВРК типа SRP 300/226 фирмы «Schottel»
а) правого борта; б) левого борта

Заключение

Анализ вибрационных параметров показывает, что значения виброскорости на характерных режимах работы элементов ГВРК левого и правого борта примерно одинаковые и не превышают предельно-допустимых норм в соответствии [14,15].

Выполненные экспериментальные исследования вибрации ГВРК в условиях сухого дока без обтекания заборной водой, показали отличие технического состояния подводной части элементов ГВРК, которые слабо себя проявляют в измерениях в обычных условиях работы в эксплуатации.

Значения параметров вибрации в узкополосном спектре с гармоническими характеристиками позволяют диагностировать признаки причин вибрации и нагрева масла ГВРК правого борта.

Рекомендации завода изготовителя фирмы «Schottel» по анализу параметров вибрации и их нормируемых значений в процессе эксплуатации ГВРК отсутствуют.

Полученные результаты исследования спектрального анализа и гармонического ряда параметров вибрации, на характерных рабочих частотах элементов ГВРК, являются хорошим дополнением существующей методики контроля [15].

Литература

1. P. J. L. Fernandes. Tooth bending fatigue failures in gears. Engineering Failure Analysis, Vol. 3, No. 3, pp. 219-225, 1996.
2. Marcelo R.F., Leonard R.K., Vaz L.A., Pinto L.V., Carlos A.R. Troyman R. Faults prevention for the gear coupling of the azimuth thruster L-drive through a study of shaft alignment measurements. Engineering Failure Analysis 152 (2023) 107504
3. M. Fonte, L. Reis, M. Freitas. Failure analysis of a gear wheel of a marine azimuth thruster. Engineering Failure Analysis. Volume 18, Issue 7, October 2011, Pages 1884-1888. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.07.009>.
4. Riku-Pekka Nikula, Mika Ruusunen, Joni Keski-Rahkonen, Lars Saarinen Fredrik Fagerholm. Probabilistic condition monitoring of azimuth thrusters based on acceleration measurements. Machines 2021, 9(2), 39; <https://doi.org/10.3390/machines9020039>.
5. L.E. Alban. Systematic analysis of gear failures. (2nd ed.), ASM, USA (1985) ISBN:0-87170-200-2.
6. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации / Николаев Н.И., Мышинский Э.Л., Гриценко М.В. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 84-90.
7. Мониторинг вибрационного состояния главных винторулевых колонок с механическим приводом морских судов в эксплуатации / Николаев Н.И., Гриценко М.В., Каракаев А.Б. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1-2 (43). С. 97-103.
8. Результаты контроля вибрации судовых технических средств в эксплуатации в соответствии с требованиями правил РС и зарубежных норм / Николаев Н.И., Гриценко М.В., Герасиди В.В. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-3 (46). С. 96-103.

9. Епихин А.И., Игнатенко А.В., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами. Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 1 (98). С. 88-96.
10. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Трапезникова Д.А. Методы оптимизации алгоритмов управления судовыми электроэнергетическими системами с целью повышения качества оптимизации. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 2 (103). С. 76-79.
11. Розенберг Г.Ш., и др. Вибродиагностика. Монография. Санкт-Петербург, 2003.
12. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 (ИСО 13373-2:2005) Контроль состояния и диагностика машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации». М.: Стандартинформ, 2019.
13. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1998.
14. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД № 2-020101-174. Санкт-Петербург. 2024.
15. Российский морской регистр судоходства. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009. Санкт-Петербург. 2024.

References

1. P. J. L. Fernandes. Tooth bending fatigue failures in gears. Engineering Failure Analysis, Vol. 3, No. 3, pp. 219-225, 1996.
2. Marcelo R.F., Leonard R.K., Vaz L.A., Pinto L.V., Carlos A.R. Troyman R. Faults prevention for the gear coupling of the azimuth thruster L-drive through a study of shaft alignment measurements. Engineering Failure Analysis 152 (2023) 107504
3. M. Fonte, L. Reis, M. Freitas. Failure analysis of a gear wheel of a marine azimuth thruster. Engineering Failure Analysis. Volume 18, Issue 7, October 2011, Pages 1884-1888. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.07.009>.
4. Riku-Pekka Nikula, Mika Ruusunen, Joni Keski-Rahkonen, Lars Saarinen Fredrik Fagerholm. Probabilistic condition monitoring of azimuth thrusters based on acceleration measurements. Machines 2021, 9(2), 39; <https://doi.org/10.3390/machines9020039>.
5. L.E. Alban. Systematic analysis of gear failures. (2nd ed.), ASM, USA (1985) ISBN:0-87170-200-2.
6. K вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации [On the issue of assessing the technical condition of marine technical means of marine vessels according to vibration parameters] / Nikolaev N.I., Myshinskij E.L., Gricenko M.V. // Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2020. № 60-61. S. 84-90.
7. Monitoring vibracionnogo sostoyaniya glavnyh vintorulevyh kolonok s mekhanicheskim privodom morskikh sudov v ekspluatatsii [Monitoring of the vibration state of the main power steering columns of marine vessels in operation] / Nikolaev N.I., Gricenko M.V., Karakaev A.B. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 1-2 (43). S. 97-103.
8. Rezul'taty kontrolya vibratsii sudovykh tekhnicheskikh sredstv v ekspluatatsii v sootvetstvii s trebovaniyami pravil RS i zarubezhnykh norm [The results of vibration control of shipboard equipment in operation in accordance with the requirements of the RS rules and foreign standards] / Nikolaev N.I., Gricenko M.V., Gerasidi V.V. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-3 (46). S. 96-103.
9. Epihin A.I., Ignatenko A.V., Studenikin D.E., Hekert E.V. Osnovnye trendy vnedreniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta v upravlenii morskimi avtonomnymi nadvodnymi sudami [The main trends in the introduction of artificial intelligence technologies in the management of marine autonomous surface vessels]. Jekspluatatsiya morskogo transporta. 2021. № 1 (98). S. 88-96.
10. Karakaev A.B., Hekert E.V., Trapeznikova D.A. Metody optimizatsii algoritmov upravleniya sudovymi jelektroenergeticheskimi sistemami s cel'ju povysheniya kachestva optimizatsii [Methods of optimization of algorithms for controlling ship electric power systems in order to improve the quality of optimization]. Jekspluatatsiya morskogo transporta. 2022. № 2 (103). S. 76-79.
11. Rozenberg G.Sh., i dr. Vibrodagnostika [Vibration diagnostics]. Monografiya. Sankt-Peterburg, 2003.
12. GOST R ISO 13373-2-2009 (ISO 13373-2:2005) Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. CHast'2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'tatov izmerenij vibratsii [Condition monitoring and diagnostics of machines. Part2. Processing, analysis and presentation of vibration measurement results]. M.: Standartinform, 2019
13. GOST ISO 10816-1-97. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij vibratsii na nevrashchayushchihsya chastyah. CHast' I. Obshchie trebovaniya [Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part II. General requirements]. M.: Izdatel'stvo standartov, 1998
14. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh sudov. CHast' VII. Mekhanicheskie ustanovki [Rules of classification and construction of sea vessels. Part VII. Mechanical installations]. ND № 2-020101-174. Sankt-Peterburg. 2024.
15. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Prilozheniya k rukovodstvu po tekhnicheskemu nablyudeniyu za sudami v ekspluatatsii [Appendices to the manual on technical supervision of ships in operation]. ND № 2-030101-009. Sankt-Peterburg. 2024.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Лисаченко Алексей Витальевич, аспирант кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

Alexey V. Lisahenko, graduate student of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

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

Marina A. Modina, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 00.00.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 00.00.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 00.00.2024

Научная статья

УДК 621.438

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.013>

Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками

Дологлонян А.В.¹ dologlonyan@mail.ru, Матвеев В.Т.¹ mvt3900@mail.ru,Клименко А.Г.¹ kag195877@gmail.com¹Институт природно-технических систем

Аннотация. Конструирование микрогазотурбинных двигателей (МГТД) с повышенными термодинамическими характеристиками на единицу расхода рабочего тела является важной задачей транспортной, мобильной энергетики, а также теплоэлектроснабжения локальных и удаленных объектов. Одним из актуальных путей решения этой задачи является повышение энергоэффективности цикла. Предметом рассмотрения в статье является исследование влияния способов повышения энергоэффективности цикла на КПД и удельную мощность для различных базовых схем микрогазотурбинных установок (МГТУ). Рассмотрены следующие способы повышения энергоэффективности цикла: повышение максимальной температуры, промежуточный перегрев и двухступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением. Применение всех модификаций позволило повысить удельную мощность базовых схем МГТУ в 2,0...2,7 раза. Показано, что, МГТУ, содержащие в составе и турбокомпрессорный утилизатор, и регенератор являются наиболее перспективными для любых модификаций.

Ключевые слова: микрогазотурбинный двигатель, регенерация теплоты, утилизация теплоты, турбокомпрессорный утилизатор, промежуточный подогрев, двухступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением.

Финансирование: Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).

Для цитирования: Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 107—115. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.013>

Microgas turbine plants with increased thermodynamic characteristics

Andrey V. Dologlonyan¹ dologlonyan@mail.ru, Valerii T. Matveenko¹ mvt3900@mail.ru,Alexander G. Klimenko¹ kag195877@gmail.com¹Institute of nature and technical systems

Annotation. The design of micro-gas turbine engines (MGTE) with increased thermodynamic characteristics per unit of working fluid flow is an important task in transport and mobile energy, as well as heat and power supply of local and remote objects. One of the current ways to solve this problem is to increase the energy efficiency of the cycle. The subject of consideration in the article is the study of the influence of methods for increasing the energy efficiency of the cycle on the efficiency and specific power for various basic schemes of microgas turbine plants (MGTP). The following methods for increasing the energy efficiency of the cycle are considered: increasing the maximum temperature, reheat and two-stage compression with intercooling. The use of all modifications made it possible to increase the specific power of the basic circuits of the MGTP by 2.0...2.7 times. It has been shown that MGTPs containing both a turbocharge utilizer and a regenerator are the most promising for any modifications.

Key words: microgas turbine engine, heat recovery, heat utilization, turbocharge utilizer, reheat, two-stage compression with intercooling.

Financial Support: The work was carried out under the state budget theme of the INTS "Creation of a scientific basis for the development of flexible combined plants with integrated renewable energy sources and the use of local cold resources (FFMM-2024-0018)" (state registration number 124020100121-6).

For citation: Andrey V. Dologlonyan, Valerii T. Matveenko, Alexander G. Klimenko. Microgas turbine plants with increased thermodynamic characteristics, Marine intelligent technologies. 2024. № 2 part 1, P. 107—115. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013

Введение

Важной задачей в конструировании ГТД является повышение их удельных термодинамических характеристик (КПД, мощность) на единицу расхода рабочего тела, что, в свою очередь, положительно влияет и на массу двигателя.

Лёгкие мощные двигатели нужны для надводного, подводного и наземного транспорта, задач мобильной энергетики, а также теплоэлектроснабжения локальных и удаленных объектов.

Известны различные направления решения указанной задачи, в частности: - конструктивное –

повышение эффективности элементов двигателя (компрессоры, турбины, камеры сгорания и т.д.);

- термодинамическое – повышение энергоэффективности цикла путем увеличения его термодинамических показателей (температуры, давления) и утилизация отработанной теплоты, а также комплексное ее использование.

В данной работе будет рассмотрено термодинамическое направление для микрогазотурбинных двигателей (МГТД) и установок с учетом имеющихся в настоящее время достижений в конструктивном направлении.

В термодинамическом направлении будут рассмотрены следующие пути повышения удельных термодинамических характеристик МГТД:

1. повышение максимальной температуры цикла;
2. утилизация теплоты отработанных газов с помощью турбокомпрессорного утилизатора;
3. промежуточный перегрев рабочего тела.

Базовые схемы МГТУ, работающие на органическом топливе

МГТД находят применение как для энергообеспечения локальных объектов, так и стационарных, технологических и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТУ принят МГТД простого цикла (см. рис. 1), который можно усложнить с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла является одновальным с блокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) осуществляется за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [1-4] с целью повышения мощности ГТД;
- применение комбинации предыдущих методов.

На рисунке 2 изображена схема МГТУ с регенерацией теплоты (ПЦ+Р), в которой по отношению к схеме МГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, что позволяет повысить КПД самого двигателя.

На рисунке 3 изображена схема МГТУ с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

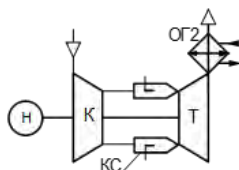


Рис. 1 – Схема когенерационной МГТУ простого цикла (ПЦ): К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка

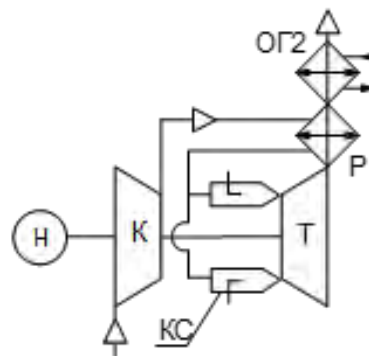


Рис. 2 – Схема когенерационной МГТУ цикла с регенерацией (ПЦ+Р): Р – регенератор; остальные обозначения как на рис. 1

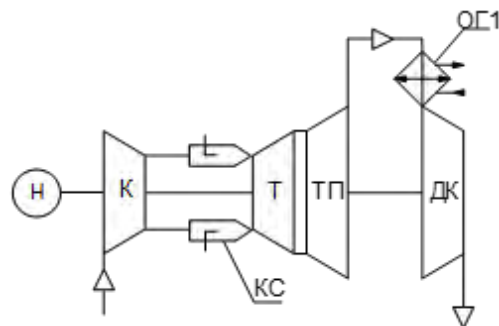


Рис. 3 – Схема МГТУ с турбиной перерасширения (ПЦ+ТКУ): ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения как на рис. 1

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, преобразовав часть ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД, а именно, за силовой турбиной МГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор разместить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором.

На рисунке 4 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия, а также выполняет функции котла-утилизатора для обеспечения локального объекта теплотой.

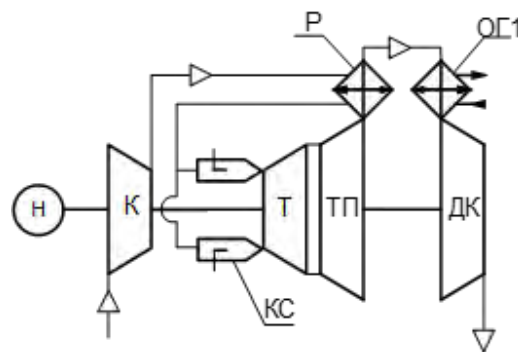


Рис. 4 – Схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты (ПЦ+ТКУ+Р): все обозначения как на рис. 1-3

Методика и результаты исследования характеристик базовых МГТУ на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТУ при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [1].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [5, 6]. В МГТУ необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [5-8]. Так политропный КПД центробежного компрессора находится в пределах $\eta_k = 80...82\%$, радиально-осевой турбины $\eta_m = 85...86,5\%$, а адиабатный КПД диагональных лопаточных машин $88...90\%$. В настоящее время применение доступных сплавов ЖС36 и ЖС40 позволяет иметь температуру газа

перед турбиной до 1373 К включительно, при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для МГТУ. Так при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменивающихся сторон [8]. Большинство мировых производителей МГТД («Микрогазотурбинные технологии», «Elliott», «Turbec», «Ingersoll R») используют степень регенерации 0,9 [9, 10].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-4, были приняты параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования базовых МГТУ

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Политропный КПД турбины	—	0,865
Политропный КПД турбины компрессора	—	0,85
Политропный КПД компрессора	—	0,82
Политропный КПД второй ступени компрессора	—	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения ¹	—	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора ²	—	0,88
КПД камеры сгорания	—	0,99
КПД электрогенератора	—	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р ³	—	$\varepsilon_a = \frac{1-r}{2c_a r} \left(\sqrt{1+4c_a \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р ³	—	$\varepsilon_a = \frac{1}{2c_a \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{dk}^2} \frac{1-r}{r} \left(\sqrt{1+4c_a \varepsilon_{oe1}^2 \pi_{dk}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха ³	—	$\varepsilon_e = 1 - \frac{c_e}{\pi_k^2} \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, ε_{ex}	—	0,96
Коэффициент восстановления давления в промежуточном охладителе воздуха, ε_{oe}	—	0,94
Коэффициент восстановления давления в КС, ε_{kc}	—	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	—	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{oe1}, \varepsilon_{oe2}$	—	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60
Примечания 1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле. 3 – коэффициенты c_a и c_e определялись из параметров существующих прототипов [10].		

Таблица 2

Параметры базовых МГТУ на номинальном режиме при $T_3 = 1203$ К и оптимальных параметрах с учетом ограничений

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	23,9	33,6	30,3	35,1
Температура газов на входе в парогенератор	К	733	524	598	506
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	11,1	4,4	8,2	3,7
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,3	1,8
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,87
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	152	132	214	168
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	426	204	283	186
КПД теплотехнический	%	90	84	69	73

Таблица 3.

Параметры базовых МГТУ на номинальном режиме при $T_3 = 1373$ К и оптимальных параметрах с учетом ограничений

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	27,7	39,0	35,4	40,6
Температура газов на входе в парогенератор	К	833	551	618	522
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	4,8	11,8	4,1
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,8	1,75
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	232	188	299	236
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	540	232	306	204
КПД теплотехнический	%	91	86	70	76

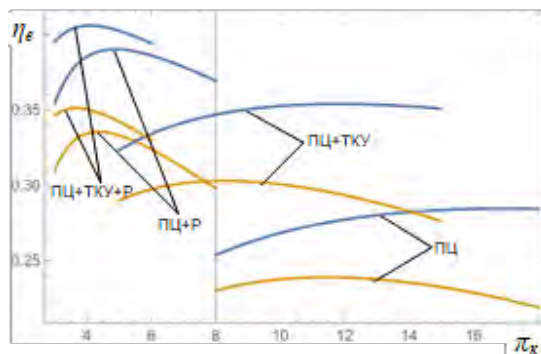


Рис. 5 – Зависимость эффективного КПД базовых конфигураций МГТУ от степени сжатия компрессора (π_k): оранжевая линия – $T_3 = 1203$ К; синяя линия – $T_3 = 1373$ К

Анализ таблиц 2 и 3 и рисунков 5 и 6 показывает, что применение ТКУ позволяет поднять эффективность и удельную мощность базовых МГТУ на базе ПЦ в 1,22...1,27 и 1,29...1,41 раза соответственно в зависимости от значения T_3 . Для МГТУ на базе ПЦ+Р применение ТКУ дает аналогичный результат – в 1,03...1,04 и 1,12...1,27 раза для КПД и удельной

мощности в зависимости от схемы реализации ТКУ и величины T_3 . Невысокий прирост эффективности, очевидно, связан с изначально высоким КПД МГТУ на базе ПЦ+Р.

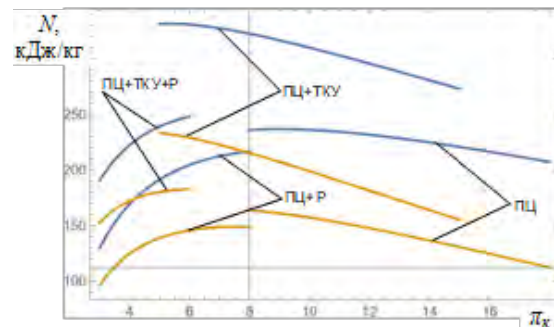


Рис. 6 – Зависимость удельной мощности базовых конфигураций МГТУ от степени сжатия компрессора (π_k): оранжевая линия – $T_3 = 1203$ К; синяя линия – $T_3 = 1373$ К

Относительный прирост КПД и удельной мощности от увеличения T_3 на 14 % представлен в таблице 4

Таблица 4

Относительный прирост КПД и удельной мощности от увеличения T_3					
Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Относительный прирост КПД	%	15,9	19,1	11,6	15,7
Относительный прирост удельной мощности	%	52,6	42,4	39,7	40,5

Данные таблицы 4 показывают, что увеличение T_3 на 14 % дает относительный прирост не только КПД, но и удельной мощности на 40 % и более. Это показывает, что возрастание энергоэффективности цикла за счет увеличения его максимальной температуры дает существенный прирост удельной мощности для всех базовых схем МГТУ, и является

весьма перспективным при условии поддержания требуемого ресурса непрерывной работы установки.

Одновременное использование ТКУ и повышения T_3 позволяет поднять удельную мощность МГТУ на базе ПЦ в 2 раза, а КПД в 1,5 раза, а на базе ПЦ+Р соответственно в 1,7 раза и в 1,2 раза.

Результаты исследования характеристик базовых МГТУ с промежуточным подогревом на номинальном режиме

Возрастание энергоэффективности цикла за счет промежуточного подогрева (ПП) рассмотрено во многих работах, например [12, 13]. В общем случае, схемы МГТД для МГТУ с ПП могут быть с блокированной турбиной и свободной силовой турбиной (ССТ). Безусловно, блокированные двигатели эффективнее на номинальном режиме, однако на долевых нагрузках машины со ССТ имеют преимущество. Наиболее перспективной, с практической точки зрения, является схема, представляющая собой газогенератор со ССТ и с промежуточной камерой сгорания (ПКС) между ними. В этом случае схемы МГТУ с ПП на основе базовых (см. рис. 1-5) примут вид, представленный на рисунках 7-10.

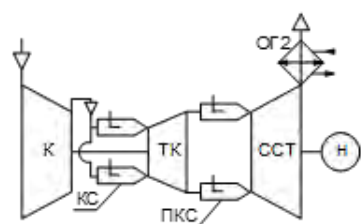


Рис. 7 – Схема МГТУ ПЦ+ПП+ССТ: ПКС – промежуточная камера сгорания; ССТ – свободная силовая турбина; ТК – турбина компрессора; остальные обозначения как на рис. 1

Параметры циклов МГТУ с ПП и ССТ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 7-10 и при $T_3 = 1373$ К, представлены в таблице 5. Сравнительные характеристики базовых МГТУ и МГТУ с ПП и ССТ также представлены на рисунках 11 и 12.

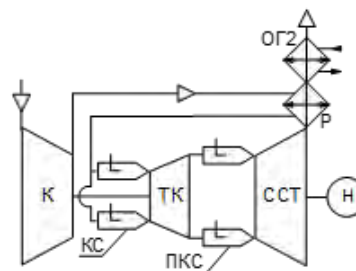


Рис. 8 – Схема МГТУ ПЦ+Р+ПП+ССТ: остальные обозначения как на рис. 1, 2, 7

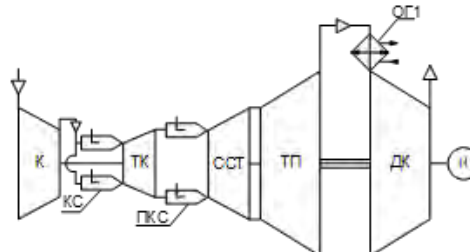


Рис. 9 – Схема МГТУ ПЦ+ТКУ+ПП+ССТ: остальные обозначения как на рис. 1, 3, 7

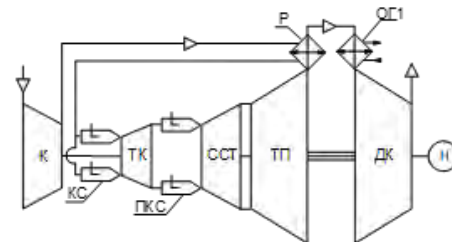


Рис. 10 – Схема МГТУ ПЦ+ТКУ+Р+ПП+ССТ: остальные обозначения как на рис. 1, 4, 7

Таблица 5

Параметры МГТУ с ПП и ССТ на номинальном режиме и оптимальных параметрах с учетом ограничений, температура перед ССТ, $T_{31} = 1373$ К

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	23,2	38,3	36	40,3
Температура газов на входе в парогенератор	К	1127	602	797	570
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	5,9	12	5,2
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	5,0	2
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кВт/кг	297	225	461	281
Удельная тепловая мощность	кВт/кг	894	283	508	254
КПД теплотехнический	%	92	85	74	75

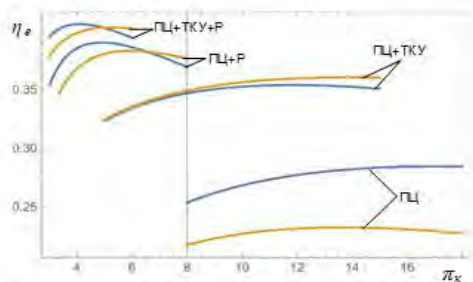


Рис. 11 – Зависимость эффективного КПД базовых конфигураций МГТУ и МГТУ с ПП и ССТ от степени сжатия компрессора (π_k): оранжевая линия – МГТУ с ПП и ССТ; синяя линия – базовая МГТУ с ПП и ССТ; $T_3 = 1373$ К

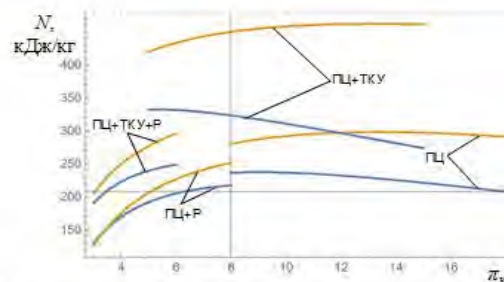


Рис. 12 – Зависимость удельной мощности базовых конфигураций МГТУ и МГТУ с ПП и ССТ от степени сжатия компрессора (π_k): оранжевая линия – МГТУ с ПП и ССТ; синяя линия – базовая МГТУ с ПП и ССТ; $T_3 = 1373$ К

В общем случае, введение ПП увеличивает степень повышения давления в компрессоре, которое распределяется между турбинами установки. Поскольку турбина компрессора работает при высоком давлении и имеет малые размеры и соответственно меньшую эффективность (см. таблицу 1), то, как и следовало ожидать, введение ПП в базовые схемы МГТУ не добавило эффективности в МГТУ с ПП и ССТ на базе ПЦ и ПЦ+Р (см. рисунок 11). В случае с установками, содержащими ТКУ общий перепад давлений

распределяется еще и на него, а его показатели эффективности ввиду масштабного эффекта выше (см. таблицу 1), что обеспечивает небольшое повышение эффективности установок с ТКУ. МГТУ с ПП и ССТ на базе ПЦ+ТКУ+Р показывает немного сниженную эффективность по сравнению с базовым вариантом т.к. возросший перепад давлений в ТКУ сильно снижает коэффициент восстановления давления на газовой стороне регенератора. Тем не менее, прирост в удельной мощности очевиден (см. таблицу 6 и рисунок 12).

Таблица 6

Изменение КПД и удельной мощности от введения ПП при $T_3 = 1373$ по отношению к базовым установкам.

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Относительное изменение КПД	%	-19,4	-1,8	1,7	-0,74
Относительный прирост удельной мощности	%	28	19,7	54	19,1

Анализируя таблицу 6, можно сказать, что применение ПП целесообразно для схем МГТУ, содержащих ТКУ.

Результаты исследования характеристик базовых МГТУ с двухступенчатым сжатием с промежуточным охлаждением и промежуточным подогревом на номинальном режиме

Для повышения эффективности установок с ПП можно использовать двухступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением (ПО) [14, 15]. С практической точки зрения, данная модификация если и пригодна для МГТД, то только для машин мощностью 1 МВт и более, при этом желательно иметь возможность жидкостного охлаждения ОВ для уменьшения его массогабаритных показателей [14]. Тем не менее, стоит сделать оценку возможных перспектив на современном этапе. Схемы МГТУ с 2-х ступенчатым сжатием (2СС) с ПО, ПП и ССТ на основе базовых представлены на рисунках 13-16.

Параметры циклов МГТУ с 2-х ступенчатым сжатием с ПО, ПП и ССТ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 15-19 и при $T_3 = 1373 \text{ K}$, представлены в таблице 7. Сравнительные характеристики МГТУ с ПП и ССТ и МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ также представлены на рисунках 17 и 18.

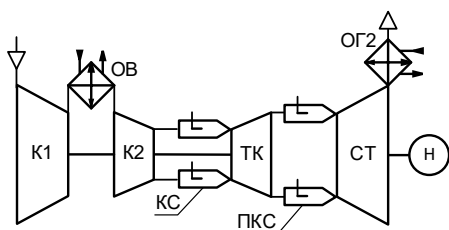


Рис. 13 – Схема МГТУ ПЦ+2СС+ПО+ПП+ССТ: К1 – компрессор низкого давления; К2 – компрессор высокого давления; ОВ – охладитель воздуха; остальные обозначения как на рис. 1. 7

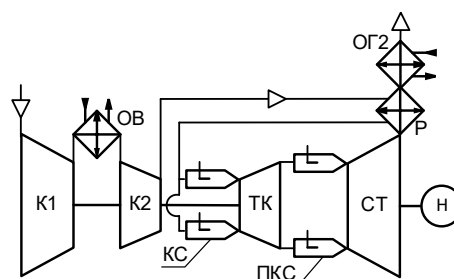


Рис. 14 – Схема МГТУ ПЦ+Р2+СС+ПО+ПП+ССТ:
остальные обозначения как на рис. 1, 8, 13

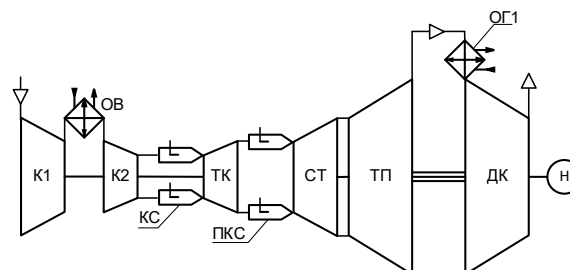


Рис. 15 – Схема МГТУ ПЦ+ТКУ+2СС+ПО+ПП+ССТ:
остальные обозначения как на рис. 1, 9, 13

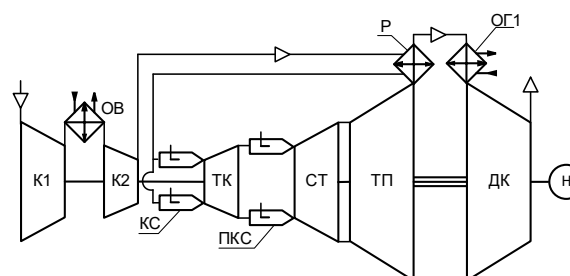


Рис. 16 – Схема МГТУ ПЦ+ТКУ+Р+2СС+ПО+ПП+ССТ:
остальные обозначения как на рис. 1, 10, 13

Таблица 7

Параметры МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ на номинальном режиме и оптимальных параметрах с учетом ограничений, температура перед ССТ, $T_{31} = 1373 \text{ K}$

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	27,1	41,1	35,7	41,9
Температура газов на входе в парогенератор	К	1029	602	731	516
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	32,3	10	25,3	8,6
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	5,0	1,8
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кВт/кг	417	306	542	344
Удельная тепловая мощность	кВт/кг	784	217	438	198
КПД теплотехнический	%	77	69	63	64

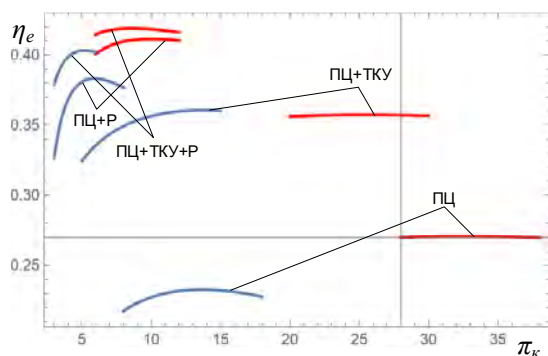


Рис. 17 – Зависимость эффективного КПД конфигураций МГТУ с ПП и ССТ и МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ от степени сжатия компрессора (π_k): красная линия – МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ; синяя линия – МГТУ с ПП и ССТ

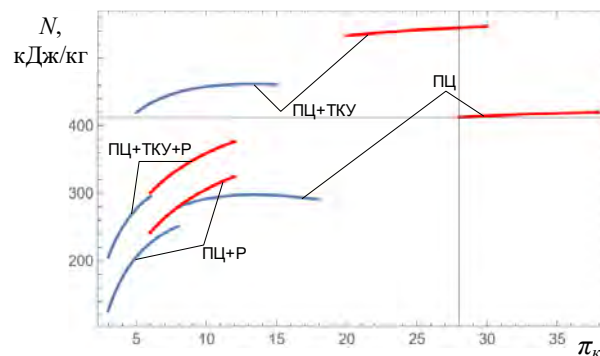


Рис. 18 – Зависимость удельной мощности конфигураций МГТУ с ПП и ССТ и МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ от степени сжатия компрессора (π_k): красная линия – МГТУ с 2СС, ПО, ПП и ССТ; синяя линия – МГТУ с ПП и ССТ

Относительный прирост КПД и удельной мощности от применения 2СС с ПО к предыдущей модификации представлен в таблице 8.

Таблица 8

Относительный прирост КПД и удельной мощности от применения 2СС с ПО

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Относительные изменения КПД	%	16,8	7,3	–0,83	3,97
Относительный прирост удельной мощности	%	40,4	36	17,6	22,4

Анализ таблиц 7 и 8, а также рисунков 17 и 18 показывает, что 2СС с ПО положительно сказывается на характеристиках МГТУ, содержащих регенератор, обеспечивая как прирост КПД, так и удельной мощности по сравнению с базовыми за счет большей прокачки теплоты через регенератор, а не снижения работы сжатия, что в реальных циклах может быть достигнуто при очень высоких степенях повышения давления. Для МГТУ на базе ПЦ применение 2СС с ПО дало существенный прирост и в КПД, и в удельной мощности за счет сильно возросшей π_k , однако эффективность так и не достигла базовой конфигурации (см. таблицу 3). Кроме того, степень повышения давления возросла в почти 3 раза, что сильно увеличит количество отводимой в ВО теплоты и негативно скажется как на его массогабаритных показателях, так и установки в целом.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение максимальной температуры цикла является универсальным средством для повышения как эффективности (возрастает как эффективный, так и теплотехнический КПД), так и удельной мощности для всех базовых конфигураций. Применение ПП эффективно для базовых конфигураций МГТУ, содержащих ТКУ, а 2СС с ПО – для МГТУ, содержащих регенератор. Таким образом, МГТУ, содержащие в составе и ТКУ, и регенератор являются наиболее перспективными для любых модификаций.

Следует также отметить, что с ростом КПД когенерационные свойства установок падают (см. таблицы 2, 3, 5, 7). Это особенно заметно для МГТУ с 2СС+ПО. Поэтому при подборе конфигураций МГТУ для локальных объектов требуется не самая эффективная установка, а самая сбалансированная по выработке и электроэнергии, и теплоты.

Литература

1. 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.
2. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine / V. Matvienko, V. Ocheretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
3. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
4. Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V. Matvienko, V. Ocheretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов газотурбинных установок с кожухотрубными регенераторами / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. № 4 (348). С. 19-27.
9. Bernard F. Kolanovski, BSME. Guide to Microturbines // 2004. Printed in the USA. p.309.
10. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
11. Барсков, В. В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Барсков Виктор Валентинович. Санкт-Петербург, 2017. 22 с. EDN XBNDQ.
12. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбинных двигателей с промежуточным подогревом газа и силовой турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Вестник СевГТУ. Энергетика. 2008. Вып. 85. С.115-119.
13. Carlo Carcas, Bruno Facchini, Comparison between two gas turbine solutions to increase combined power plant efficiency, Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 8, 2000, Pages 757-773, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00150-8).
14. В. П. Сотников Термодинамический аспект мультипроцессного сжатия газа с промежуточным охлаждением // Вестник двигателестроения. 2013. №2. С. 16-22.
15. Meherwan P. Boyce. Gas Turbine Engineering Handbook. Fourth Edition // 2012. Printed in the USA. p.993.

References

1. 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.
2. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine / V. Matvienko, V. Ocheretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
3. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
4. Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V. Matvienko, V. Ocheretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Dologlonjan A.V. Optimizacija stepeni regeneracii dlja ciklov gazoturbinyh ustanovok s kozhuhotrubnymi regeneratorami [Optimization of regeneration rate for cycles of gas turbine plants with housing tube regenerators] / A.V. Dologlonjan, V.T. Matveenko, V.A. Ocheretjanyj // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. № 4 (348). pp. 19-27.
9. Bernard F. Kolanovski, BSME. Guide to Microturbines // 2004. Printed in the USA. p.309.

10. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
11. Barskov, V. V. Vybora parametrov i obosnovanie konstruktivnoj shemy malogabaritnoj gazoturbinoj ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chastot vrashhenija rotorov turbiny i kompressora [Selection of parameters and justification of the design scheme of a small-sized gas turbine installation with an independent ratio of rotation speeds of the turbine and compressor rotors]: special'nost' 05.04.12 «Turbomashiny i kombinirovannye turboustanovki»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk / Barskov Viktor Valentinovich. Sankt-Peterburg, 2017. 22 p.
12. Matveenko V.T. Teplotekhnicheskie harakteristiki kogeneracionnyh gazoturbinnih dvigatelej s promezhutochnym podogrevom gaza i silovoj turbinoj pererasshirenija [Thermal characteristics of cogeneration gas turbine engines with gas intermediate heating and an overexpansion power turbine] / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretjanyj // Vestnik SevGTU. Jenergetika. 2008. Vyp. 85. pp.115-119.
13. Carlo Carcasci, Bruno Facchini, Comparison between two gas turbine solutions to increase combined power plant efficiency, Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 8, 2000, Pages 757-773, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00150-8).
14. V. P. Sotnikov Termodinamicheskij aspekt mul'tiprocessnogo szhatija gaza s promezhutochnym ohlazhdeniem [Thermodynamic aspect of multi-process gas compression with intermediate cooling] // Vestnik dvigatelestroenija. 2013. №2. pp. 16-22.
15. Meherwan P. Boyce. Gas Turbine Engineering Handbook. Fourth Edition // 2012. Printed in the USA. p.993.

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

Дологлонян Андрей Вартазарович, кандидат **Andrey V. Dologlonyan**, Ph.D., assistant professor, технических наук, доцент, ведущ. науч. сотр., зав. Leading Researcher, Chief of Eco-energys Laboratory, лабораторией эконергетики, Институт природно- Institute of nature and technical systems, Lenina, 11 St., технических систем Российской Федерации, г. Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: Севастополь 299011, ул. Ленина, 11, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Матвеенко Валерий Тимофеевич, доктор **Valerii T. Matveenko**, Dr. Sci., Chief Researcher, Institute технических наук, гл. науч. сотр., Институт природно- of nature and technical systems, Lenina, 11 St., технических систем Российской Федерации, г. Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: Севастополь 299011, ул. Ленина, 11, e-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр Георгиевич, ведущий инженер- **Alexander G. Klimenko**, Leading Research Engineer, исследователь, Институт природно-технических Institute of nature and technical systems, Lenina, 11 St., систем Российской Федерации, г. Севастополь 299011, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: ул. Ленина, 11, e-mail: kag195877@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 14.05.2024.

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.014>

Оптимизация дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма

Епихин А.И.¹ bsmbeton@mail.ru, Е. В. Хекерт Е.В.¹ zur_mga@nsma.ru,
Модина М.А.¹ marishamodina@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В последние десятилетия в процессе проектировании судовых силовых установок основное внимание уделяется энергоэффективности и низкому уровню выбросов загрязняющих веществ. В данном случае особую актуальность приобретает использование более совершенных вычислительных подходов, таких как генетический алгоритм, который имеет очень высокую точность для получения оптимального решения, поэтому он очень хорошо подходит для оптимизации дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы. В статье рассматривается вариант решения задачи по оптимизации дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма. Разработана блок-схема решения поставленной оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма. Описанный в статье подход позволяет подобрать режим более экономичных нагрузок для дизель-генераторов на основе спроса на мощность энергетической системы судна, в целом, в зависимости от конкретного режима плавания. Сделан вывод, что оптимизация дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма приводит к значительному снижению расхода топлива для двух из трех режимов работы (транзит (1) и динамическое позиционирование (3)). В статье описана процедура оптимизации, ориентированная на оптимальное проектирование дизель-электрической судовой силовой установки. В частности, генетический алгоритм был использован для нахождения топливно-эффективных нагрузок для дизель-генераторов на основе потребности в нагрузке энергетической системы судна.

Ключевые слова: дизель, генерация, нагрузка, судно, генетический алгоритм.

Для цитирования: Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Оптимизация дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 116—121. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.014

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.014>

Optimization of a diesel-electric marine propulsion and power generation system using a genetic algorithm

Alexey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru, Evgeniy V. Heckert¹ zur_mga@nsma.ru,
Marina A. Modina¹ marishamodina@yandex.ru

¹Admiral F.F. Ushakov State Maritime University

Abstract. In recent decades, the design process of marine propulsion systems has focused on energy efficiency and low pollutant emissions. In this case, the use of more advanced computational approaches such as genetic algorithm, which has a very high accuracy to obtain the optimal solution, so it is very well suited for the optimization of diesel-electric ship propulsion and power generation system, is of particular relevance. The paper discusses a variant of solving the optimization problem of diesel-electric ship propulsion and power generating system using genetic algorithm. The block diagram of the solution of the set optimization problem with the use of genetic algorithm is developed. The approach described in the article allows to select the mode of more economical loads for diesel generators on the basis of demand for the power of the ship's power system, in general, depending on the specific mode of navigation. It is concluded that optimization of the diesel-electric ship propulsion and power generation system using a genetic algorithm leads to a significant reduction in fuel consumption for two of the three modes of operation (transit (1) and dynamic positioning (3)). The paper describes an optimization procedure focused on the optimal design of the diesel-electric ship propulsion system. In particular, a genetic algorithm was used to find fuel-efficient loads for diesel generators based on the load demand of the ship's power system.

Keywords: diesel, generation, load, vessel, genetic algorithm.

For citation: Alexey I. Epikhin, Evgeniy V. Heckert, Marina A. Modina, Optimization of a diesel-electric marine propulsion and power generation system using a genetic algorithm, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 116—121. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.014

Введение

В последние десятилетия в процессе проектирования судовых силовых установок основное внимание уделяется энергоэффективности

и низкому уровню выбросов загрязняющих веществ. В этих рамках дизель-электрическая силовая установка стала стандартом для многих типов судов и доказала свою ценность с точки зрения гибкой конструкции энергетической системы и методов

управления ею. По сравнению с судами, работающими на топливе, дизель-электрические гибридные суда имеют преимущества высокой топливной эффективности и хорошей маневренности, а также обладают большей гибкостью в распределении мощности между движителем и нагрузкой [1].

При использовании дизель-электрической пропульсивной системы нет необходимости устанавливать редуктор, валопровод, что дает возможность более эффективно распределять оборудование в доступных пространствах, снижая при этом акустическую сигнатуру судна и шумовое облучение. Кроме того, отсутствует механическая связь между гребным валом и генератором энергии, что позволяет обеспечить более гибкое управление скоростью вращения как гребных винтов, так и двигателей. В конечном итоге, потребность в электроэнергии может быть распределена между дизель-генераторами с большим количеством возможных вариаций, повышением безопасности и эксплуатационной готовности судна [2].

Пример дизель-электрической пропульсивной системы судна показан на рисунке 1.

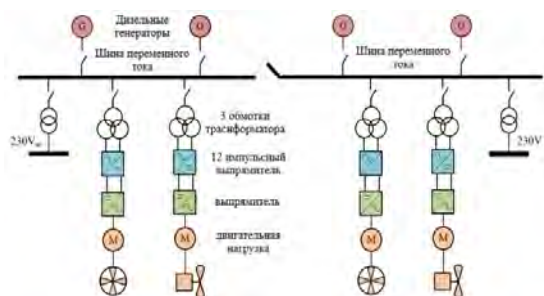


Рис. 1 Дизель-электрическая силовая установка

Как показывает рисунок 1, силовая установка содержит важные компоненты, которые имеют свои собственные показатели надежности. Эксплуатационная и компоновочная гибкость дизель-электрических силовых установок дает возможность получить достаточно много степеней свободы, непосредственно на этапе проектирования по сравнению с традиционными силовыми установками. Однако воспользоваться этими степенями свободы не так просто. В тоже время, существует множество методов оптимизации их работы, например, метод прямого поиска и метод градиентного поиска [3]. Однако эти классические методы могут быть медленными из-за большого количества итераций или непригодными для прерывных и недифференциальных функций.

В данном случае особую актуальность приобретает использование более совершенных вычислительных подходов, таких как генетический алгоритм, который имеет очень высокую точность для получения оптимального решения, поэтому он хорошо подходит для оптимизации дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы. Необходимость более подробного раскрытия данной тематики и предопределяет выбор темы статьи.

Материалы и методы

Над вопросами развития и усовершенствования модели гибридной энергосистемы судна трудятся

такие авторы как Irwin, R. W.; Tinker, M. L.; Xie, Ye; Savvaris, Al; Tsourdos, Antonios.

Различные варианты решения задачи выбора оптимальных подходов к управлению распределением мощности между накопителями энергии и дизель-генераторами представлены в трудах Андрушина А. В., Хлыстовой К. Б., Гаврилова В. В., Жукова В. А., Gao, Diyu; Wang, Tianzhen; Wang, Y.; Xu, Xiaobin.

Анализ имеющихся публикаций и работ позволил выделить ряд вопросов, которые требуют дальнейшей проработки и углубленного анализа. Так, в уточнении нуждается алгоритм определения оптимальной стратегии распределения нагрузки в непроектных условиях, который будет опираться на преимущества высокой гибкости дизель-электрических силовых установок. Особого внимания заслуживают перспективы использования стратегии оптимизации дизель-электрической судовой установки на основе комбинации генетического алгоритма и нейросетевого моделирования.

Цель и задачи

Цель статьи заключается в рассмотрении возможностей оптимизации дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью генетического алгоритма.

Задачи исследования:

- 1) рассмотреть задачи оптимизации работы силовой установки;
- 2) предложить вариант решения оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма;
- 3) представить результаты эксперимента и тестирования генетического алгоритма.

Результаты

Стандартная схема дизель-электрической генерации и приведения в движение судов предусматривает использование нескольких одинаковых дизельных двигателей. Это удобно, прежде всего, для обслуживания, поскольку нет необходимости покупать запчасти для разных систем. В этом контексте цель оптимизации состоит в том, чтобы устранить это ограничение, позволяя установке включать двигатели различных размеров, чтобы максимизировать производительность и эффективность работы в расчетных условиях. Соответственно задача проектирования формулируется как оптимизационная задача, и генетический алгоритм используется для поиска решения, в данном случае, для нахождения минимального расхода топлива при расчетных условиях.

По сравнению с другими алгоритмами локальной минимизации генетический алгоритм обладает интересными особенностями, подходящими для рассматриваемой задачи: он позволяет эффективно работать с категориальными или целочисленными переменными и недифференцируемыми функциями стоимости, так как не требует вычисления производных, и является алгоритмом глобальной оптимизации, поэтому он с меньшей долей вероятности застрянет в локальных минимумах функции стоимости. По этой причине генетические алгоритмы находят широкое применение во многих областях промышленности, когда необходимо

решить задачу выбора множества переменных, влияющих на одну сложную систему. Примерами могут служить выбор оптимальных рабочих параметров дизельного двигателя, подбор параметров комбинированного цикла или оптимальное распределение фотоэлектрических систем для максимизации производительности электрической микросети.

На рисунке 2 представлена блок-схема решения поставленной оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма.



Рис. 2 Блок-схема использования генетического алгоритма для оптимизации дизель-электрической судовой установки

Основные характеристики ГА, используемого в данном исследовании следующие:

- предположим, что стоит задача оптимизировать функцию от d переменных. Хромосома — это d -мерный массив, представляющий решение: $x = (x_1, x_2, \dots, x_d) \in R^d$ задачи $f(x)$. В данном исследовании задается $x_i \in [-10.10]$ для $i=1, \dots, d$;

- популяция в предложенном генетическом алгоритме состоит из 100 хромосом. В первом поколении все хромосомы генерируются случайным образом. Для следующего поколения популяция будет состоять из некоторых хромосом предыдущего поколения и некоторых новых хромосом, полученных в результате скрещивания и мутации;

- функция приспособленности равна объективной (тестовой) функции $f(x)$;

- используется турнирный отбор для выбора двух родительских хромосом перед проведением скрещивания. Размер турнирного отбора равен пяти. Для этого сначала случайным образом выбираются пять хромосом из популяции. Затем хромосома с наилучшей приспособленностью выбирается в качестве первого родителя. Второй

родитель выбирается аналогичным образом. При такой схеме хромосомы с лучшей приспособленностью имеют большую вероятность быть выбранными;

- предположим, что есть две родительские хромосомы, $x = (x_1, \dots, x_d)$ и $y = (y_1, \dots, y_d)$. Сначала мы создаем пустую дочернюю хромосому $z = (z_1, \dots, z_d)$. Затем производится скрещивание, для $i = 1, \dots, d$, выбирая:

$$z_i \in \left\{ x_i, y_i, \frac{x_i + y_i}{2} \right\} \quad (1)$$

который обеспечивает наилучшую приспособленность для z . При таком скрещивании гарантируется, что дочерняя хромосома будет равна или лучше родительской. За одно поколение генетический алгоритм генерирует 100 дочерних хромосом с помощью этого скрещивания;

- мутация применяется ко всем дочерним хромосомам, полученным в результате скрещивания, с вероятностью $p_m = 1$. Предположим, что в результате скрещивания получена хромосома $z = (z_1, \dots, z_d)$. Сначала создается пустая дочерняя хромосома $w = (w_1, \dots, w_d)$. Затем производится мутация, для $i = 1, \dots, d$, путем выбора лучшего:

$$w_i \in \{z_i, z_i + \epsilon_i, z_i - \epsilon_i\} \quad (2)$$

и ϵ_i выбирается случайным образом из:

$$\left[-\frac{1}{2u}, \frac{1}{2u} \right] \quad (3)$$

где u - номер текущего поколения. При такой мутации также гарантируется, что новая хромосома будет равна или лучше старой;

- селекция, которая используется в данном исследовании, представляет собой замену элитизма на фильтрацию. Она выполняется путем объединения 100 старых хромосом (предыдущего поколения) и 100 дочерних хромосом, полученных в результате скрещивания и мутации. Затем все 200 хромосом сортируются на основе их значений пригодности. Если есть хромосома, которая равна другим хромосомам, то остается только одна хромосома, все остальные удаляются. Если количество оставшихся хромосом меньше 100, генерируются новые случайные хромосомы, пока не получится 100 хромосом. Лучшие 100 хромосом будут переданы следующему поколению, а остальные хромосомы будут отброшены.

- условием остановки является достижение или недостижение максимального числа поколений. В данном исследовании максимальное число поколений равно 10000.

Важным моментом при использовании генетического алгоритма для решения оптимизационных задач является определение так называемой генетической кодировки [4]. Пусть NDG — это количество моделей дизель-генераторов, имеющихся в наборе данных, каждая из которых имеет номер N_i , мощность P_i и частоту вращения n_i , а $i = \{1, 2, \dots, NDG\}$ обозначает модель двигателя. Кодирование в случае двигателей с регулируемой частотой вращения имеет следующий вид:

$$X = \{N_i, n_i, P_i\} \quad (4)$$

В свою очередь генетическое кодирование решения в случае, когда двигатели управляются с постоянной скоростью вращения, с распределением переменного тока, выглядит следующим образом:

$$X = \{N_i, P_i\}, n_i = n_i^{des} \quad (5)$$

где n_i^{des} обозначает номинальную скорость вращения i -й модели двигателя.

Общую электрическую мощность при выборе решения X можно выразить приведенными ниже соотношениями, соответственно, в случае распределения постоянного и переменного тока:

$$P_{el}(X) = \sum_{i=1}^{NDG} N_i P_i \eta_{gen,i} \eta_{ACDC,i} \quad (6)$$

$$P_{el}(X) = \sum_{i=1}^{NDG} N_i P_i \eta_{gen,i} \quad (7)$$

где $\eta_{gen,i}$ - КПД i -го генератора переменного тока, а $\eta_{ACDC,i}$ - КПД i -го AC/DC-преобразователя, установленного только с распределением постоянного тока.

Ранжирование решений после каждого поколения в генетическом алгоритме осуществляется с помощью функции стоимости. В рамках проводимого исследования оптимизация направлена на минимизацию общего массового расхода топлива:

$$\min[FC(P_k)] = \min[\sum_{k=1}^n SFC(P_k) \times P_k] \quad (8)$$

где SFC - удельный расход топлива; $FC(P_k)$ - расход топлива при определенной выходной мощности P_k .

Также используем ограничение четырех дизельных генераторов на борту судна:

$$P_L = \sum_{k=0}^n P_k \quad (9)$$

где P_L - мгновенная потребность в нагрузке.

Определение ограничений является решающим шагом, который позволит получить достоверный и обоснованный результат.

В первую очередь, следует определить границы решений:

$$\{0, n_{i,min}, P_{i,m}\} \leq \{N_i, n_i, P_i\} \leq \{N_{i,max}, n_{i,max}, P_{i,max}\} \quad (10)$$

Следующим шагом является установление лимитов для требуемой скорости, которые будут иметь вид нелинейного ограничения. В частности, генерируемой мощности P_{el} должно хватать для того, чтоб обеспечить требуемую скорость судна $V(X)$. Если есть пр гребных винтов, тогда тяга T , необходимая для каждого винта, задается следующим уравнением:

$$T = \frac{R_T}{n_p(1-t)} \quad (11)$$

где R_T - сопротивление судна, а t - коэффициент вычитания тяги.

Мощность, требуемая электрическим двигателям, описывается следующими уравнениями, относящимися к распределению постоянного и переменного тока, соответственно:

$$P_{EPM} = \frac{(1-\omega)VT}{\eta_0 \eta_r \eta_s \eta_{EPM} \eta_{DCAC}} \quad (12)$$

$$P_{EPM} = \frac{(1-\omega)VT}{\eta_0 \eta_r \eta_s \eta_{EPM}} \quad (13)$$

где w - фракция волнения, η_r и η_s - относительный КПД вращения и КПД механической передачи, соответственно, η_0 - КПД гребного винта на открытой воде, η_{EPM} и η_{DCAC} - КПД электродвигателя и преобразователя постоянного/переменного тока соответственно.

Следует акцентировать внимание на том, что t , ω , η_r зависят от скорости судна, а η_0 - от условий работы гребного винта.

Для определения оптимальной конфигурации силовой установки необходимо решить следующую оптимизационную задачу, объединяющую выше представленные уравнения:

$$\begin{cases} \min_{\{N_i, n_i, P_i\}} \sum_{i=1}^{NDG} N_i P_i SFOC_i(n_i, P_i) \\ n_{i,min} \leq n_i \leq n_{i,max} \\ P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}(n_i) \\ P_{el} \geq n_p P_{EPM} + P_{aux} \end{cases} \quad (14)$$

Для проведения эксперимента и тестирования генетического алгоритма используем четыре дизель-генератора с максимальной нагрузкой 3000кВт каждый. К ним будет применяться ряд нагрузок от 3000кВт до 12000кВт, результаты тестирования по возможным сценариям нагрузки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение нагрузки генератора при оптимизации с использованием генетического алгоритма (ГА) и при равномерной нагрузке

Нагрузка (кВт)	Нагрузка генераторов с ГА (кВт)				Равномерная нагрузка (кВт)			
	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
3000	3000	0	0	0	1500	1500	0	0
3600	1800	1800	0	0	1800	1800	0	0
4200	2100	2100	0	0	2100	2100	0	0
4800	2400	2400	0	0	2400	2400	0	0
5400	3000	2400	0	0	2700	2700	0	0
6000	3000	3000	0	0	2000	2000	2000	0
6600	2200	2200	2200	0	2200	2200	2200	0
7200	2096,6	3000	2103,43	0	2400	2400	2400	0
7800	3000	2400	2400	0	2600	2600	2600	0
8400	3000	3000	2400	0	2800	2800	2800	0
9000	3000	3000	3000	0	2250	2250	2250	2250
9600	3000	2199	2200	2200	2400	2400	2400	2400
10200	2135	2086	2979	3000	2550	2550	2550	2550
10800	3000	3000	2197	2603	2700	2700	2700	2700
11400	2400	3000	3000	3000	2850	2850	2850	2850
12000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000

Традиционный метод нагрузки дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы заключается в равномерном распределении общей нагрузки на активные генераторы. Количество используемых дизель-генераторов зависит от потребности в электрической нагрузке.

Для исследуемого судна использовались три режима работы, а именно: транзит (1), маневрирование (2) и динамическое позиционирование (3). Общее время, затрачиваемое в каждом режиме, составляет 24%, 8%, 25% от общего времени, соответственно. Типичная электрическая нагрузка для каждого режима работы составляет 7605,73 кВт, 6509,17 кВт, 5242,226 кВт.

Используя эти данные, можно сравнить нагрузку дизельгенераторов спроектированную на основании оптимизационного алгоритма ГА с равномерной

нагрузкой дизель-генераторов. Результаты моделирования приведены в таблице 2 вместе с расходом топлива.

Таблица 2

Сравнение расхода топлива для различных режимов работы дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы

Режим	Нагрузка (кВт)	Нагрузка генераторов с ГА (кВт)				FC (кг/ч)	Равномерная нагрузка генераторов (кВт)				FC (кг/ч)	Экономия на FC (кг/ч)	Экономия в год (кг)
		G1	G2	G3	G4		G1	G2	G3	G4			
1	7605,73	3000	2303	2303	0	1621,0	2535	2535	2535	0	1623,98	2,98	6525,54
2	6509,17	2170	2170	2170	0	1398,2	2170	2170	2170	0	1398,2	0	0
3	5242,26	2242	3000	0	0	1115,54	2621	2621	0	0	1118,5	2,96	6478,9

Выводы

Анализ таблицы 2 позволяет сделать вывод, что оптимизация дизель-электрической судовой пропульсивной и энергогенерирующей системы с помощью ГА приводит к значительному снижению расхода топлива для двух из трех режимов работы. Причина, по которой ГА не оптимизирует расход топлива для режима маневрирования, заключается в том, что равная нагрузка дизель-генераторов

является оптимальным решением для критерия минимизации общего массового расхода топлива.

Таким образом, в статье описана процедура оптимизации, ориентированная на оптимальное проектирование дизель-электрической судовой силовой установки. В частности, генетический алгоритм был использован для нахождения топливно-эффективных нагрузок для дизель-генераторов на основе потребности в нагрузке энергетической системы судна.

Литература

1. Лобачев М. П., Новоселов В. Н. Валидация методики оптимизации пропульсивного комплекса транспортного судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 4 (398). С. 68-80.
2. Bakhtiari, Mohammad Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm. Ships and offshore structures. 2021. Volume 16: Number 6; pp 650-658.
3. Beatrice, Carlo Model based optimal management of a hybrid propulsion system for leisure boats. Journal of energy storage. 2022. Volume 46; pp 76-83.
4. Gao, Diju Optimal Thrust Allocation Strategy of Electric Propulsion Ship Based on Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II. IEEE access: practical innovations, open solutions. 2019. Volume 7; pp 135247-135255.

References

1. Лобачев М. П., Новоселов В. Н. Валидация методики оптимизации пропульсивного комплекса транспортного судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 4 (398). С. 68-80.
2. Bakhtiari, Mohammad Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm. Ships and offshore structures. 2021. Volume 16: Number 6; pp 650-658.
3. Beatrice, Carlo Model based optimal management of a hybrid propulsion system for leisure boats. Journal of energy storage. 2022. Volume 46; pp 76-83.
4. Gao, Diju Optimal Thrust Allocation Strategy of Electric Propulsion Ship Based on Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II. IEEE access: practical innovations, open solutions. 2019. Volume 7; pp 135247-135255.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Епихин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет им. Ф. Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Alexey I. Epikhin, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation of Marine Mechanical Installations, Novorossiysk State Maritime University, 353924, Novorossiysk, pr. Lenina, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 07.05.2024

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.015>

Интеллектуальная диагностика судового двигателя на базе нейронных сетей и модифицированного генетического алгоритма

Епихин А.И.¹ bsmbeton@mail.ru, Хекерт Е.В.¹ zur_mga@nsma.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Статья посвящена разработке методики интеллектуальной диагностики судовых двигателей, который позволит объединить имеющиеся знания о судовых двигателях и передовые методы анализа данных. В статье рассмотрены особенности проведения интеллектуальной диагностики судового двигателя на базе инструментария нейронных сетей и генетического алгоритма. Основу методики составляет процедура распознавания «диагностического портрета» судового двигателя с использованием акустического и вибрационного сигнала. В процессе исследования были протестированы различные генетические алгоритмы на примере диагностики элементов судового двигателя. В рамках исследования предложен модифицированный генетический алгоритм, который даст возможность обеспечить повышение точности, надежности и быстродействия получения диагностических параметров. Основная идея этой сети заключается в применении вейвлет-нейрона вместо традиционного нейрона, а затем в разложении сигнала путем анализа вейвлета с несколькими разрешениями. вейвлет-нейронная сеть сочетает в себе хорошую способность вейвлет-преобразования к локализации времени-частоты, а также имеет значительный потенциал для самообучения. Для анализа эффективности предложенного алгоритма рассмотрены изменения значения пригодности и изменения квадратичной ошибки. Кривая изменения значения пригодности отражает рост эволюционной алгебры, колебания уровня пригодности популяции, а квадратичная ошибка отражает оптимизацию весов и порогов с увеличением генетического поколения.

Ключевые слова: нейронная сеть, двигатель, судно, генетический алгоритм, диагностика.

Для цитирования: Епихин А.И., Хекерт Е.В. Интеллектуальная диагностика судового двигателя на базе нейронных сетей и модифицированного генетического алгоритма, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 122—127. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.015

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.015>

Intelligent diagnostics of a marine engine based on neural networks and a modified genetic algorithm

Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru, Evgeniy V. Khekert¹ zur_mga@nsma.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The article is devoted to the development of a methodology for intelligent diagnostics of ship engines, which will combine existing knowledge about ship engines and advanced methods of data analysis. The article discusses the features of carrying out intelligent diagnostics of a marine engine based on neural network tools and a genetic algorithm. The method is based on the procedure for recognizing the "diagnostic portrait" of a marine engine using an acoustic and vibration signal. In the course of the study, various genetic algorithms were tested on the example of diagnosing ship engine elements. As part of the study, a modified genetic algorithm is proposed, which will provide an opportunity to improve the accuracy, reliability and speed of obtaining diagnostic parameters. The main idea of this network is to use a wavelet neuron instead of a traditional neuron and then decompose the signal by analyzing the wavelet with multiple resolutions. The wavelet neural network combines the good ability of the wavelet transform to time-frequency localization, and also has a significant potential for self-learning. To analyze the effectiveness of the proposed algorithm, changes in the fitness value and changes in the quadratic error are considered. The fitness value change curve reflects the growth of evolutionary algebra, population fitness fluctuations, and the squared error reflects the optimization of weights and thresholds with increasing genetic generation.

Keywords: neural network, engine, ship, genetic algorithm, diagnostics.

For citation: Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Khekert Intelligent diagnostics of a marine engine based on neural networks and a modified genetic algorithm, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 122—127. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.015

Введение

С быстрым развитием мировой экономики, усложнением хозяйственных связей безотказная логистика морских перевозок играет решающую роль в поддержке и развитии глобальных цепочек формирования стоимости перевозимых грузов. В данном контексте надежная и стабильная работа

судовой энергетической установки (СЭУ) имеет решающее значение. Для того чтобы удовлетворить рыночные запросы и потребности производства, элементы СЭУ должны устойчиво работать в течение длительного периода времени, а иногда и в состоянии значительной перегрузки, что зачастую приводит к отказам судовых двигателей.

Когда эти отказы происходят, они могут повлечь за собой огромные потери, что выводит на первый план проблему диагностики состояния судовых двигателей. Если неисправности могут быть обнаружены и своевременно устранены в соответствии с эксплуатационными данными оборудования, потери можно предупредить или эффективно восстановить.

Цели и задачи

По мере разработки и расширения знаний об интеллектуальных методах анализа, проводятся исследования в области диагностики технического состояния судовых двигателей посредством удаленного мониторинга и поддержки данных, собранных из различных источников. Однако эти данные имеют большую размерность, значительную погрешность измерений, недостаточное количество и качество значений наблюдаемых параметров, что затрудняет определение состояния двигателей со сложными режимами отказов в различных условиях эксплуатации [1, 11].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов диагностики судовых двигателей, которые позволят объединить знания о судовых двигателях и передовые методы анализа данных, что и предопределяет выбор темы данной статьи.

Материалы и методы

Вопросам, связанным с решением сложных оптимизационных задач в процессе интеллектуального анализа технического состояния судовых установок, посвятили свои труды Герасиди В. В., Николаев Н. И., Лисаченко А. В., Васильков Д. В., Коротков Е. Б., Щеглов К. Н., Рубцов О. А.

Однако проблемные аспекты, связанные с автоматизацией процесса обнаружения дефектных элементов судовых двигателей для упрощения и ускорения процесса обслуживания судов, повышения надежности диагностирования состояния СЭУ не нашли своего окончательного решения.

С учетом вышеизложенного, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей реализации интеллектуальной диагностики судового двигателя на базе нейронных сетей и генетических алгоритмов.

В рамках проводимого исследования представляется целесообразным рассмотреть более детально процедуры распознавания «диагностического портрета» судового двигателя, что позволит определить его вибрационные и акустические образы для осуществления диагностики технического состояния [5]. Для реализации поставленной задачи предлагаем использовать нейронную сеть и генетический алгоритм. Считаем, что данный подход даст возможность обеспечить повышение точности, надежности и быстродействия получения диагностических параметров, а также их более точную оценку [6].

Определение акустического или вибрационного сигнала

В качестве признаков акустического или вибрационного сигнала для диагностики узлов

двигателя сформируем информативные частоты согласно следующей методике:

Процедура 1 – Вычисление множества частот дефектации K_j , K_{jr} :

$$K_1 = \bigcup_{r=1}^4 K_{1r}, K_{11} \in \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, K_{12} \in \left\{ l \cdot \frac{f_4}{m} \right\} \quad (1)$$

$$K_{13} \in \left\{ l \cdot \frac{f_5}{m} \right\}, K_{14} \in \left\{ l \cdot \frac{f_6}{m} \right\}, K_2 \in \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\} \quad (2)$$

$$K_3 \in \left\{ l \cdot \frac{f_7}{m} \right\}, K_4 \in \left\{ l \cdot \frac{f_8}{m} \right\}, l, m \in \mathfrak{H} \quad (3)$$

где $\mathfrak{H}$ – множество натуральных чисел, f_i — информативные частоты, r – номер класса деталей узлов, j – номер класса узла, l – номер гармоники ($m = 1$) или субгармоники ($m > 1$).

Процедура 2 – Вычисление спектра $A_{up}(k)$ акустического сигнала $x_p(n)$ для каждой p -й реализации эксперимента на узлах с помощью прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$d_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} g_{n+1m} \quad (4)$$

$$c_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} h_{n+2m} \quad c_{0n} = x^p(n) \quad (5)$$

$$A^{2p}(k) = \begin{cases} c_{lm}, & k = m \wedge m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \\ d_{lm}, & k = N/2^l + m \wedge m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \wedge l \in \overline{1, L} \end{cases} \quad (6)$$

$$m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \quad (7)$$

где clm , d_{lm} — аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты ДПФ, L — количество уровней разложения.

Нейронная сеть

Для распознавания «диагностического портрета» судового двигателя предлагаем использовать вейвлет-нейронную сеть. Основная идея этой сети заключается в применении вейвлет-нейрона вместо традиционного нейрона, а затем в разложении сигнала путем анализа вейвлета с несколькими разрешениями [2]. Кроме того, эта сеть очень хорошо подходит для аппроксимации любой функции. В соответствии с вышеуказанными особенностями, можно констатировать тот факт, что вейвлет-нейронная сеть сочетает в себе хорошую способность вейвлет-преобразования к локализации времени-частоты, а также имеет значительный потенциал для самообучения. Благодаря использованию вейвлет-факторов масштаба и коэффициентов перевода вейвлет-изменений, ряд после вейвлет-преобразования становится более гибким, и может иметь эффективные возможности аппроксимации функций и распознавания образов [7], [8].

Таким образом, распознавание состояния объекта и узла судового двигателя осуществляется на основе вейвлет-нейронной сети, которая вычисляет номер зоны вибрации и имеет следующий вид:

$$f_u(x) = \arg \max_i \min_k \left(\exp \left[- \left(\frac{x_k - m_{uik}}{\sigma_{uik}} \right)^2 \right] \right), i \in \overline{1, 4}, k \in \overline{1, N} \quad (8)$$

где m_{uik} – математическое ожидание численного значения k -й компоненты u -го вектора признаков для объекта или узла в i -й зоне вибрации.

$$m_{uik} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P q^{up}(k), k \in \overline{1, N} \quad (9)$$

где σ_{uik} – среднеквадратическое отклонение численного значения k -й компоненты вектора признаков для объекта или узла в i -й зоне вибрации.

$$\sigma_{uik} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (q^{up}(k))^2 - (m_{uik})^2}, k \in \overline{1, N} \quad (10)$$

где x_k - k -я компонента вектора признаков.

При выборе вейвлет-функции необходима симметрия. Следовательно, вейвлет-функция должна иметь две характеристики одновременно: симметрию во временной области и линейную фазу [3]. Только таким образом, после процесса вейвлет-преобразования, фазовая информация о состоянии элементов двигателя может гарантировать отсутствие искажений.

Кроме того, критически важно для вейвлет-нейронной сети правильно выбрать узлы для скрытых слоев. Этот выбор оказывает непосредственное влияние на конечные результаты интеллектуального анализа. Предлагается для выбора количества узлов в скрытом слое использовать следующую эмпирическую формулу:

$$\text{Number} = \sqrt{nm + cn + d} \quad (11)$$

где, Number - число узлов скрытого слоя вейвлетной нейронной сети, n - число входных узлов вейвлетной нейронной сети; m - число выходных узлов вейвлетной нейронной сети; c и d - независимые параметры.

Для уменьшения трудоемкости адаптации численных значений компонентов ключевых векторов, отражающих параметры работы судового двигателя, предлагаем использовать генетический алгоритм, содержащий следующие блоки: 1) представление особей и создание исходной популяции – особью с вещественными генами, являются многочисленные значения компонентов эталонов работы двигателя; 2) фитнес-функция – критерий надежности; 3) оператор репродукции – пропорциональный отбор; 4) оператор кроссинговера – дискретная рекомбинация; 5) оператор мутации; 6) оператор редукции [9], [10], [12].

Результаты

Модифицированный генетический алгоритм

В процессе исследования были протестированы различные генетические алгоритмы на примере диагностики элементов судового двигателя. В таблице 1 представлены результаты, которые свидетельствуют о том, что наиболее эффективными алгоритмами являются канонический и дженитор.

Таблица 1

Сравнение результативности генетических алгоритмов, используемых для диагностики элементов судового двигателя

Генетический алгоритм	Простой	Островной	Дженитор	Канонический
популяции из 8 особей				
Ошибка, %	24	18,4	17,1	16,8
Время, с.	0,3	0,5	0,2	0,1
популяции из 16 особей				
Ошибка, %	16,9	19,1	15,3	8,9
Время, с.	0,2	0,3	0,1	0,2
популяции из 32 особей				
Ошибка, %	21,2	8,1	6,7	10,1
Время, с.	0,4	0,4	0,3	0,2
популяции из 64 особей				
Ошибка, %	17,6	10,1	9,5	7,5
Время, с.	0,1	0,5	0,3	0,3
популяции из 128 особей				
Ошибка, %	19,7	7,1	10,2	6,9
Время, с.	0,51	0,69	0,59	0,19
популяции из 256 особей				

Ошибка, %	13,6	17,9	12,3	8,2
Время, с.	0,9	0,8	0,9	0,9
популяции из 512 особей				
Ошибка, %	9,7	11,7	9,1	9,6
Время, с.	5,3	4,5	6,6	5,1
популяции из 1024 особей				
Ошибка, %	21,6	6,4	11,6	9,7
Время, с.	12,8	18,3	5,1	7,4

Чтобы ускорить решение задачи диагностирования судового двигателя, автором был разработан модифицированный генетический алгоритм.

Предложенный алгоритм предполагает прохождение следующих этапов:

- инициализация первоначального массива «population», количество элементов данного массива является четным, а последний элемент массива – это последний элемент в текущей выборке;
- расчет функции пригодности;
- нахождение последовательности «past» прошлого, которая наиболее точно соответствует текущей;
- использование модифицированного оператора кроссинговера к элементам последовательности «population»;
- определение в рамках какого количества итераций N величины параметров потомка будут наиболее точно соответствовать значениям элемента, который следует за последним элементом «past» в основной выборке данных;
- применение генетического алгоритма к выборке «population» N раз.

Особенностью предложенного модифицированного алгоритма является две отличительные черты: во-первых, шкалирование функции пригодности, и, во-вторых, использование модифицированного оператора кроссовера.

Рассмотрим отмеченные особенности более подробно.

Шкалирование функции пригодности

Для преобразования функции пригодности есть две причины. Во-первых, чтобы предотвратить преждевременную сходимость алгоритма. Во-вторых, в конечной фазе работы алгоритма популяция может стать очень разнородной, причем среднее значение будет не сильно отличаться от максимального. Шкалирование может исправить ситуацию, когда особи лучшего и среднего качества при селекции получают почти одинаковое количество копий.

Преждевременная сходимость алгоритма заключается в том, что достаточно качественные, но не оптимальные хромосомы могут доминировать в популяции (особенно если применять метод рулетки). Шкалирование функции пригодности предохраняет популяцию от доминирования неоптимальной особи.

Линейное шкалирование преобразует функцию пригодности F в функцию F' по следующему линейному закону:

$$F' = a \cdot F + b \quad (12)$$

где a и b - постоянные, которые обеспечивают следующие требования, наложенные на новообразованную функцию:

- среднее значение функции пригодности после шкалирования не изменяется;

- максимальное значение функции пригодности после шкалирования становится кратным значению функции до преобразования.

Коэффициент кратности выбирается от 1.2 до 2 и накладываются условия на положительность функции.

Отсечение типа sigma преобразует функцию пригодности F в функцию F' по следующему закону:

$$F' = F + (\bar{F} - c \cdot \sigma) \quad (13)$$

где $\bar{F}$ – средняя стоимость функции пригодности популяции; c – целое число от 1 до 5; σ – стандартное отклонение популяции.

Если F' становится отрицательной, считают, что она равна нулю.

Степенным шкалированием преобразование проводится следующим образом:

$$F' = F^k \quad (14)$$

k выбирают близким к единице.

Модифицированный оператор кроссовера

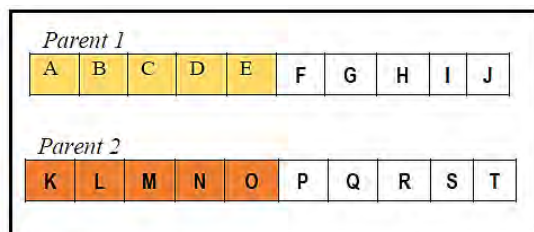
В рамках модифицированного алгоритма предлагаем использовать новый и менее сложный оператор кроссовера – Push and Pop Exchange Genes Crossover (PPX).

Использование этого оператора было введено для ускорения процесса кроссинговера и сокращения

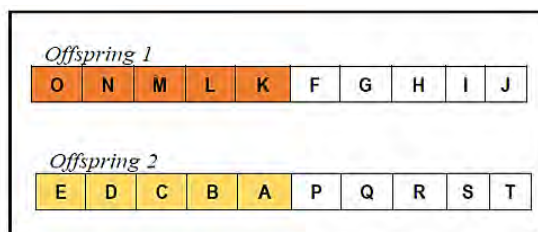
времени обработки данных. Суть работы данного оператора заключается в следующем. На начальном этапе выбирается n -ное количество элементов (или родителей) для процесса кроссинговера. На последующих шагах коллекция элементов подвергается двум основным операциям: push и pop, в результате которых удаляется последний добавленный элемент, который еще не был удален. Порядок, в котором элементы сбрасываются со стека, свидетельствует о подходе «последний на первый» (LIFO).

На начальном этапе выбирается n -ное количество элементов (или родителей) для процесса кроссинговера. На последующих шагах коллекция элементов подвергается двум основным операциям: push и pop, в результате которых удаляется последний добавленный элемент, который еще не был удален. Порядок, в котором элементы сбрасываются со стека, свидетельствует о подходе "последний на первый" (LIFO).

Ограничения, накладываемые на стек, показаны на рисунке 1, где изображены элементы до и после процесса кроссинговера, соответственно. Для элементов A, B, C, D и E, добавленных в стек в таком порядке, элемент E удаляется первым, поскольку он был последним элементом, вставленным в стек в соответствии с LIFO.



Элементы перед процессом скрещивания



Элементы после процесса скрещивания

Рис. 1 Демонстрация работы модифицированного кроссовера PPX

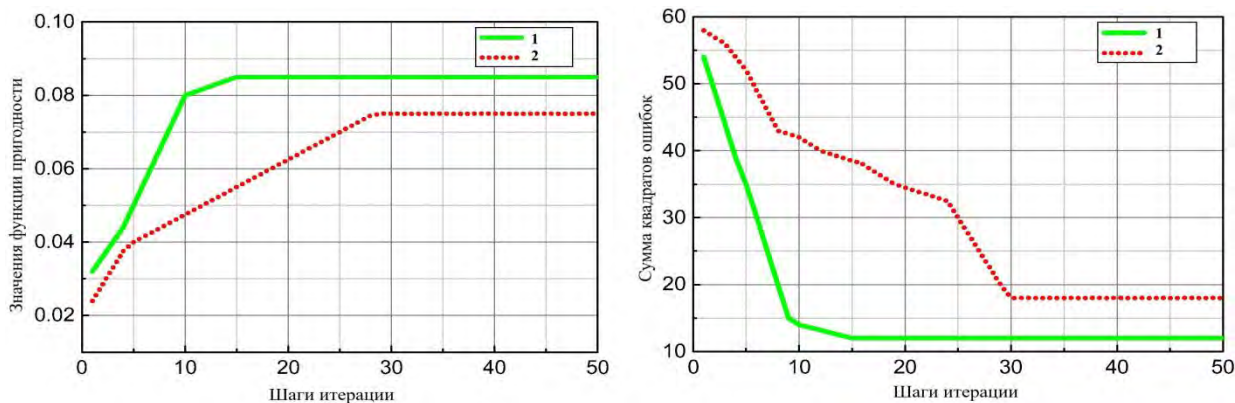
С целью эмпирической проверки эффективности разработанного алгоритма было проведено его тестирование и полученные результаты сравнивались с предыдущими (см. табл. 2).

Таблица 2
Сравнение результатов работы генетических алгоритмов

Генетический алгоритм	Модифицированный	Дженито р	Канонический
популяции из 8 особей			
Ошибка, %	16,4	17,1	16,8
Время, с.	0,1	0,2	0,1
Популяции из 16 особей			
Ошибка, %	9,1	15,3	8,9
Время, с.	0,1	0,1	0,2
популяции из 32 особей			
Ошибка, %	8,6	6,7	10,1
Время, с.	0,1	0,3	0,2
популяции из 64 особей			
Ошибка, %	5,9	9,5	7,5
Время, с.	0,1	0,3	0,3
популяции из 128 особей			
Ошибка, %	5,8	10,2	6,9

Время, с.	0,2	0,59	0,19
Популяции из 256 особей			
Ошибка, %	6,2	12,3	8,2
Время, с.	0,8	0,9	0,9
популяции из 512 особей			
Ошибка, %	8,6	9,1	9,6
Время, с.	3,9	6,6	5,1
популяции из 1024 особей			
Ошибка, %	8,2	11,6	9,7
Время, с.	5,2	5,1	7,4

Также для анализа эффективности предложенного алгоритма можно рассмотреть изменения значения пригодности и изменения квадратичной ошибки. Кривая изменения значения пригодности отражает рост эволюционной алгебры, колебания уровня пригодности популяции, а квадратичная ошибка отражает оптимизацию весов и порогов с увеличением генетического поколения [4]. Сравнение кривой значения пригодности и кривой изменения квадратичной ошибки показано на рис. 2.



1 – модифицированный алгоритм, 2 – канонический алгоритм

Рис. 2 Кривые значения пригодности и квадрата ошибки

Из кривой изменения значения пригодности видно, что канонический генетический алгоритм находит лучшее решение популяции после 30 поколений, а модифицированный получил оптимум примерно через 16 поколений. Решение и процесс оптимизации были значительно улучшены, также удалось достигнуть хорошего эффекта оптимизации значения фитнес-функции. По квадрату ошибки и кривой видно, что при использовании канонического генетического алгоритма квадратичная ошибка и спад демонстрируют относительно более медленную динамику и стабилизируются после 30 поколений. Однако в случае применения модифицированного алгоритма для оптимизации весов и порогов нейронной сети, квадратичная суммарная ошибка в первых 10 поколениях резко снизилась, и стабилизировалась около 16-го поколения.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного генетического алгоритма на практике.

Выводы

Подводя итоги, отметим, что в статье описана методика интеллектуальной диагностики судового двигателя, которая предусматривает первичную процедуру создания акустического и вибрационного паспорта двигателя и дальнейшую обработку полученных данных с использованием нейронной сети и модифицированного генетического алгоритма, что позволяет существенно сократить время выявления неисправностей.

Отличительной особенностью разработанного модифицированного генетического алгоритма является шкалирование функции пригодности, что позволяет предотвратить преждевременную сходимость алгоритма и предохраняет популяцию от доминирования неоптимальной особи. Также предложено использовать модифицированный оператор кроссовера PPX, который является менее сложным, благодаря чему можно сократить время обработки данных и улучшить производительность генетического алгоритма.

Литература

- Cheliotis M. Bayesian and machine learning-based fault detection and diagnostics for marine applications. Ships and offshore structures. 2022. № 12; pp 2686-2698.
- Jiang, Y. Ship engine detection based on wavelet neural network and FPGA image scanning. Alexandria engineering journal. 2021. № 5; pp 4287-4297.
- Li, Yi-Guang Diagnostics of power setting sensor fault of gas turbine engines using genetic algorithm. The aeronautical journal: covering all aspects of aerospace. 2017. Volume 121: Number 1242; pp 1109-1130.
- Xu, Xiaojian Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models. Knowledge-based systems. 2020. Volume 190; pp 89-93.
- Lan, Feng Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine Journal of physics. Conference series. 2020. Volume 1670; pp 23-28.
- Components for Smart Autonomous Ship Architecture Based on Intelligent Information. Technology Procedia computer science. 2018. No. 134; pp 91-98.
- Епихин, А. И. Использование искусственной нейронной сети для определения уровня износа цилиндропоршневой группы судового двигателя. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1-1(59). С. 112-119. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.013.
- Aodong Zhao, Nan Zhang Edge Testing of Noisy Image Based on Wavelet Neural Network. Aut. Control Comp. Sci. 57, 61–69 (2023).
- Subramanian, R.R. and Vasudevan, V., A deep genetic algorithm for human activity recognition leveraging fog computing frameworks, J. Visual Commun. Image Representation, 2021, vol. 77, no. 5, p. 103132.
- Gharsalli, L. and Guérin, Ya., Mechanical sizing of a composite launcher structure by hybridizing a genetic algorithm with a local search method, Compos. Part C, 2021, vol. 5, no. 7, p. 100125.
- Епихин А.И., Хекерт Е.В., Иванченко А.А., Зеленков Г.А. Интеллектуальная система управления судовой энергетической установкой с использованием адаптивного многорежимного нейросетевого регулятора применительно к морским автономным судам. Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 4 (101). С. 112-119.

12. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Применение нейронных сетей на базе многослойного перцептрона с использованием нечеткой логики для технической диагностики судовых технических средств. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3 (96). С. 111-119.

References

1. Cheliotis M. Bayesian and machine learning-based fault detection and diagnostics for marine applications. Ships and offshore structures. 2022. № 12; pp 2686-2698.
2. Jiang, Y. Ship engine detection based on wavelet neural network and FPGA image scanning. Alexandria engineering journal. 2021. № 5; pp 4287-4297.
3. Li, Yi-Guang Diagnostics of power setting sensor fault of gas turbine engines using genetic algorithm. The aeronautical journal: covering all aspects of aerospace. 2017. Volume 121: Number 1242; pp 1109-1130.
4. Xu, Xiaojian Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models. Knowledge-based systems. 2020. Volume 190; pp 89-93.
5. Lan, Feng Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine Journal of physics. Conference series. 2020. Volume 1670; pp 23-28.
6. Components for Smart Autonomous Ship Architecture Based on Intelligent Information. Technology Procedia computer science. 2018. No. 134; pp 91-98.
7. Epikhin A.I. Using an artificial neural network to determine the wear level of the cylinder piston group of a marine engine. Marine intelligent technologies. 2023. No. 1-1(59). pp. 112-119. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.013.
8. Aodong Zhao, Nan Zhang Edge Testing of Noisy Image Based on Wavelet Neural Network. Aut. Control Comp. Sci. 57, 61–69 (2023).
9. Subramanian, R.R. and Vasudevan, V., A deep genetic algorithm for human activity recognition leveraging fog computing frameworks, J. Visual Commun. Image Representation, 2021, vol. 77, no. 5, p. 103132.
10. Gharsalli, L. and Guérin, Ya., Mechanical sizing of a composite launcher structure by hybridizing a genetic algorithm with a local search method, Compos. Part C, 2021, vol. 5, no. 7, p. 100125.
11. Yepikhin A.I., Khekert Ye.V., Ivanchenko A.A., Zelenkov G.A. Intel'lectual'naya sistema upravleniya sudovoy energeticheskoy ustanovkoy s ispol'zovaniyem adaptivnogo mnogorezhimnogo neyrosetevogo regul'yatora primenitel'no k morskim avtonomnym sudam [Intelligent control system for a ship's power plant using an adaptive multi-mode neural network controller as applied to offshore autonomous ships]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2021. № 4 (101). S. 112-119.
12. Yepikhin A.I., Kondrat'yev S.I., Khekert Ye.V. Primeneniye neyronnykh setey na baze mnogoslennogo pertseptrona s ispol'zovaniyem nechetkoy logiki dlya tekhnicheskoy diagnostiki sudovykh tekhnicheskikh sredstv [Application of neural networks based on a multilayer perceptron using fuzzy logic for technical diagnostics of ship technical equipment]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2020. № 3 (96). S. 111-119.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Епихин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственной морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Aleksey I. Epikhin, Ph.D., assistant professor, assistant professor of the Department "Operation of Ship Mechanical Installations", Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: bsmbeton@mail.ru

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 17.05.2024

Научная статья

УДК 621.43; 621.313.33

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.016>

Индицирование дизеля цифровой обработкой сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления

Коньков А.Ю.¹ akonkov1964@gmail.com, Демаков К.К.¹ toyotafanat@mail.ru,Трунов А.И.² a_n_t_r_u_n@mail.ru¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения,²Тихоокеанский государственный университет

Аннотация. В работе рассмотрена методика получения индикаторной диаграммы на основе расчетного анализа сигнала скорости изменения давления в цилиндре. Исследована возможность определения фаз закрытия клапанов газораспределительного механизма анализом высокочастотной составляющей измеряемого сигнала. Показано влияние частоты дискретизации на точность определения давления в цилиндре. В основе измерительного канала использовались пьезоэлектрический датчик Kistler 6613EQ13-C и преобразователь "ток-напряжение", выполненный на основе схемы, предложенной А. В. Буэно с соавторами. В качестве эталонных датчиков применялись датчик давления ДДГ200/700 производства НПК «Гарант» и датчик линейного перемещения Gefran PY-2-F-025-S01M. Экспериментальные исследования, проведенные для двух типов четырехтактных среднеоборотных судовых дизелей, показали удовлетворительное совпадение основных результатов индицирования для экспериментального и эталонного измерительных каналов, а также подтвердили взаимосвязь между высокочастотной составляющей сигнала скорости изменения давления и работой клапанов газораспределительного механизма с учетом выявленных недостатков.

Ключевые слова: дизель, индицирование, внутрицилиндровое давление, скорость изменения давления, индикаторная диаграмма, газораспределительный механизм, вибрация, угол закрытия клапана.

Для цитирования: Коньков А.Ю., Демаков К.К., Трунов А.И. Индицирование дизеля цифровой обработкой сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 128—135. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.016

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.016>

Obtaining a diesel indicator diagram by in-cylinder pressure change rate digital signal processing

Aleksey Yu. Kon'kov¹ akonkov1964@gmail.com, Konstantin K. Demakov¹ toyotafanat@mail.ru,Anton I. Trunov² a_n_t_r_u_n@mail.ru¹Far Eastern State Transport University, Russian Federation,²Pacific National University, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the method of obtaining the indicator diagram by calculating the in-cylinder pressure change rate signal. The authors investigated the possibility of determining the closing phases of gas distribution mechanism valves by analyzing the high-frequency component of the measured signal. It is shown how sampling frequency affects the accuracy of pressure determination in the cylinder. The measuring channel was based on the Kistler 6613EQ13-C piezoelectric sensor, and the "current-voltage" transducer based on the scheme proposed by A. V. Bueno et al. The reference sensors were the DDG 200/700 pressure sensor by the RPC "Garant" and the Gefran PY-2-F-025-S01M linear displacement sensor. Experimental studies carried out for two types of four-stroke medium-speed marine diesel engines showed a satisfactory convergence of the main indication results for the experimental and reference measurement channels and confirmed the relationship between the high-frequency component of the pressure change rate signal and the operation of the valve of the gas distribution mechanism, considering the identified shortcomings.

Key words: diesel, in-cylinder pressure, pressure change rate, indicator diagram, gas distribution mechanism, vibration, valve closing angle.

For citation: Aleksey Yu. Kon'kov, Konstantin K. Demakov, Anton I. Trunov Obtaining a diesel indicator diagram by in-cylinder pressure change rate digital signal processing. Marine intellectual technologies 2024. № 2 part 1, P. 128—135. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.016

Введение

В настоящее время дизели являются одним из самых распространенных типов энергетических установок, применяемых как в качестве главных, так и вспомогательных судовых двигателей. Одним из направлений развития судовых дизелей в последние десятилетия является совершенствование систем

управления и мониторинга технического состояния, направленное на обеспечение автоматизированного контроля диагностических параметров дизеля в процессе эксплуатации [1, 2].

Важнейшей характеристикой дизеля, позволяющей вычислить ряд качественных и количественных показателей организации рабочего процесса и оценить техническое состояние

двигателя, является индикаторная диаграмма (ИД), представляющая собой зависимость давления в цилиндре от перемещения поршня, объема цилиндра или угла поворота коленчатого вала. В современных электронных системах индицирования для получения ИД применяют, как правило, сигналы с двух датчиков – датчика давления и датчика положения коленчатого вала. В ряде случаев установка датчика положения коленчатого вала может быть затруднена из-за отсутствия непосредственного доступа к валу двигателя.

Для установившихся режимов работы двигателя известен альтернативный подход – асинхронное определение ИД, не требующее установки датчика положения коленчатого вала. В работе [3] рассматриваются два метода асинхронного определения ИД: первый заключается в аппроксимации участка сжатия ИД некоторой функцией известного вида, второй – в определении положения коленчатого вала по положению максимума на характеристике скорости изменения

внутрицилиндрового давления, получаемой путем численного дифференцирования сигнала давления. Второй метод представляется нам более предпочтительным, поскольку позволяет получить дополнительную диагностическую информацию непосредственно анализом характеристики скорости изменения давления [4, 5]. Однако, в работе [3] отмечены и недостатки такого подхода, одним из которых является повышенная чувствительность к качеству сигнала с датчика давления: случайная составляющая данного сигнала при его дифференцировании становится гораздо заметнее, из-за чего данные скорости изменения давления оказываются сильно зашумленными. Как вариант решения этой проблемы в работах [6, 7] рассматривается непосредственное измерение сигнала скорости изменения давления, основанное на применении схемы преобразования токового сигнала на выходе пьезоэлектрического датчика в напряжение (рис. 1).

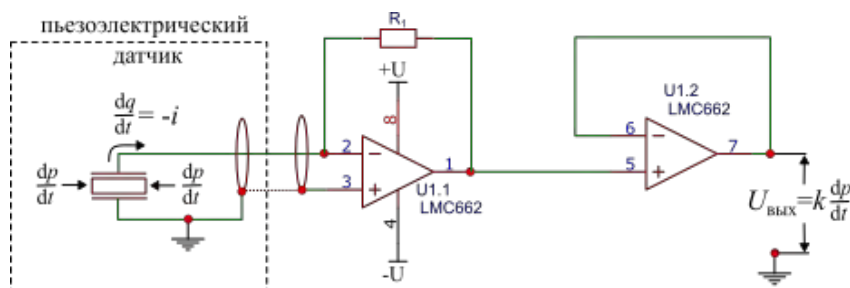


Рис. 1. Схема преобразователя «ток-напряжение» [6]

Благодаря простоте электронной схемы преобразователя, построенной на одной микросхеме с минимумом дополнительных компонентов, такой подход позволяет также снизить стоимость аппаратной части индикатора при условии вычисления внутрицилиндрового давления численным интегрированием измеренного сигнала скорости изменения давления. Ранее нами был опробован такой способ получения ИД [8], в связи с чем в данной работе мы считаем возможным кратко повторить лишь основные положения предлагаемой методики и результаты ее экспериментальной проверки. На данном этапе развитие начатой работы выполнено в направлении оценки возможности получения дополнительной диагностической информации о работе клапанного механизма газораспределения анализом сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления.

В работе [9] приводится пример сигнала с датчика скорости изменения давления, содержащий в себе высокочастотную составляющую. Согласно выдвинутой в данной работе гипотезе, наличие этой составляющей связано с тем, что пьезоэлектрический преобразователь в датчике работает также как датчик вибрации, реагируя на удары, возникающие при закрытии клапанов газораспределительного механизма (ГРМ). Эта гипотеза подтверждается и данными, представленными разработчиками пьезоэлектрических датчиков давления [10]. При этом высокочастотная составляющая считается вредной, ухудшающей метрологические характеристики датчика давления. На наш взгляд,

при достаточной большой частоте дискретизации исходного сигнала скорости давления, высокочастотная составляющая не оказывает существенного влияния на вычисляемый сигнал давления.

Вместе с тем, выполненные ранее исследования [11] показывают возможность определения, как минимум, фазы закрытия клапанов, что безусловно повышает диагностическую ценность сигнала. Согласно исследованиям [12, 13], посвященным возможности определения тепловых зазоров в клапанном механизме, виброакустический метод превосходит по своим возможностям методы, основанные на анализе давления в цилиндре и во впускном коллекторе.

Целью настоящей работы является совершенствование системы диагностирования дизеля на основе анализа сигнала скорости изменения внутрицилиндрового давления.

Для ее достижения были поставлены и решены следующие задачи:

- разработана методика получения индикаторной диаграммы цифровой обработкой временной зависимости скорости изменения давления;
- экспериментально изучены взаимосвязи высокочастотной составляющей сигнала скорости изменения давления с параметрами работы клапанного механизма.

1. Получение индикаторной диаграммы

Сигнал скорости изменения давления в цилиндре имеет на участках сжатия локальные максимумы (т. А на рис. 2). Они отстоят от ВМТ на величину $\Delta\varphi$,

которая зависит, в основном, от размеров цилиндра и кривошипно-шатунного механизма дизеля, а влияние других факторов на эту величину несущественно [3, 14]. Таким образом, при индцировании дизеля без применения отдельного датчика положения коленчатого вала найденные при анализе сигнала локальные максимумы могут послужить в качестве меток цикла, имеющих место каждые два оборота вала (в случае с четырехтактным дизелем).

Для дизеля, работающего на установившемся режиме, зная величину $\Delta\varphi$, можно разбить сигнал скорости изменения давления на циклы, а затем произвести интегрирование сигнала для получения ИД. При этом следует учитывать вычислительную ошибку интегрирования и произвести корректировку постоянной составляющей давления [4], а также применить коррекцию положения ВМТ одним из известных методов, например путем сопоставления измеренного и вычисленного значения давления на участке сжатия через коэффициент взаимной корреляции [14-16].

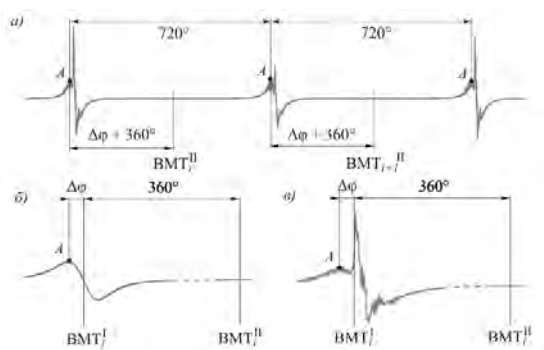


Рис. 2. Схема разбиения сигнала скорости изменения давления на циклы и определения положений ВМТ для 4-тактного дизеля [8]: а) фрагмент с тремя неполными циклами; б) подача топлива отключена; в) подача топлива включена; ВМТ^I – ВМТ на границе тактов сжатия и рабочего такта; ВМТ^{II} – ВМТ на границе тактов выпуска и впуска

В рамках данного исследования применялся измерительный канал, состоящий из пьезоэлектрического датчика Kistler 6613EQ13-С и преобразователя «ток-напряжение», схема которого аналогична схеме (см. рис. 1), предложенной А. Буэно и соавторами [6]. В качестве эталонного датчика давления был взят датчик ДДГ200/700 производства НПК «Гарант».

Тарировка исследуемого измерительного канала выполнялась на грузопоршневом манометре МП-60 путем сброса избыточного давления с заранее известного значения до нуля. Результаты тарировки показали достаточно хорошее совпадение сигналов, получаемых при помощи исследуемого и «эталонного» измерительных каналов. Подробно методика тарировки измерительного канала описана в работе [8].

Результаты экспериментального исследования, ранее опубликованные в работе [8], показали в целом хорошее совпадение вычисленного сигнала давления p_c измеренному p_a , при этом наличие высокочастотной составляющей в исходном сигнале скорости изменения давления не оказало существенного влияния на ИД (рис. 3). Максимальное расхождение сигналов для наихудшего случая достигало 0,118 МПа, или около 4% от максимального давления в цилиндре.

Исследование влияния частоты дискретизации сигнала скорости изменения давления на результаты численного интегрирования [11] показало, что при частоте дискретизации менее 20 кГц как в сигнале скорости изменения давления, так и в ИД наблюдаются значительные искажения, и поэтому запись сигнала скорости изменения давления для последующей обработки необходимо осуществлять с частотой дискретизации не менее 20 кГц.

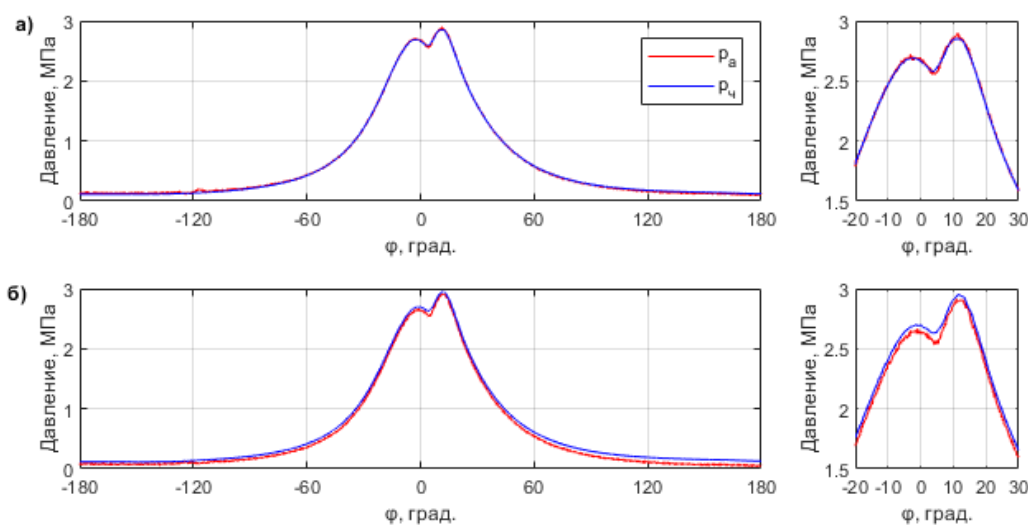


Рис. 3. Примеры ИД, полученных с использованием датчика скорости изменения давления и датчика давления [8]: а) - цикл с наименьшим расхождением сигналов; б) - цикл с наибольшим расхождением сигналов; p_a – ИД, полученная непосредственным измерением; p_c – ИД, полученная расчетным анализом сигнала скорости изменения давления; φ – угол поворота коленчатого вала относительно ВМТ такта сжатия

2. Оценка работы клапанного механизма по сигналу скорости изменения давления

Исследование высокочастотной составляющей сигнала скорости изменения давления выполнялось на дизеле установки ИТ9-3 и на отсеке дизеля ОЧН 18/22 при отключенной подаче топлива в обоих случаях. Помимо датчика скорости изменения давления, к экспериментальным установкам подключались датчик вибрации ДН-4-М1, устанавливавшийся на головку цилиндра, и датчик линейного перемещения Gefran PY-2-F-025-S01M, с помощью которого поочередно измерялся ход впускного и выпускного клапанов.

Результаты сопоставления сигналов с датчика вибрации и с датчика скорости изменения давления

показали хорошее совпадение импульсов по фазам в обоих сигналах (рис. 4, а, б). Спектральный анализ (рис. 4, в) показал, что на спектрограмме сигнала скорости изменения давления прослеживается увеличение мощности сигнала на частотах до 600-700 Гц, а также на частотах около 3 кГц и около 11 кГц. В области высоких частот оба сигнала обладают схожими наборами преобладающих частот, что особенно заметно на частотах от 11,5 кГц и выше. Поэтому сигнал, получаемый при помощи исследуемого измерительного канала, следует рассматривать как сумму низкочастотного сигнала скорости изменения давления и высокочастотного сигнала вибрации в месте установки пьезоэлектрического датчика.

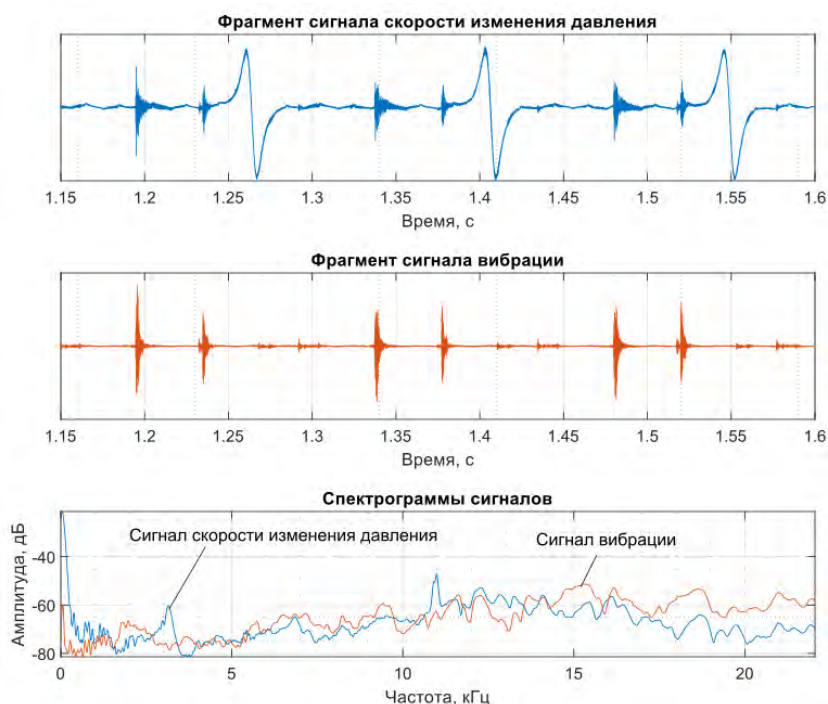


Рис. 4. Сравнительный анализ сигнала скорости изменения давления и сигнала вибрации в области головки цилиндра дизеля установки ИТ9-3

Для определения моментов закрытия клапанов ГРМ, выраженных углами запаздывания φ_z , использовалась следующая методика. В ходе обработки сигнала в программной среде MATLAB при помощи команды **envelope** была получена огибающая сигнала скорости изменения давления (рис. 5). Через участок огибающей в области переднего фронта вибрации, по форме близкий к прямой линии, была построена прямая, полученная аппроксимацией данного участка. Моментом закрытия клапана считалась точка пересечения данной прямой с нулевой линией. Одновременно моменты закрытия клапанов определялись и по сигналу датчика линейного перемещения, точка пересечения которого с нулевой линией также принималась за момент закрытия клапана. Падение данного сигнала ниже нуля объясняется тем, что якорь датчика линейного перемещения после закрытия клапана продолжает движение по инерции и, поэтому, данный участок при анализе следует игнорировать.

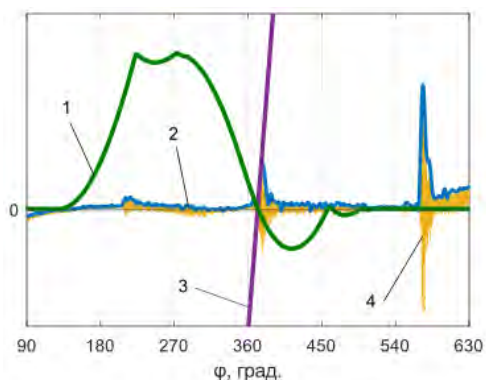


Рис. 5. Методика определения момента закрытия выпускного клапана ГРМ: 1 – сигнал с датчика перемещения клапана; 2 – огибающая сигнала скорости изменения давления; 3 – прямая, полученная аппроксимацией переднего фронта вибрации; 4 – сигнал скорости изменения давления

Результаты исследования взаимосвязи высокочастотной составляющей сигнала с работой клапанов ГРМ на дизеле установки ИТ9-3, опубликованные в работе [11], показали удовлетворительную согласованность вибрации с моментами закрытия впускного и выпускного клапанов, сопровождающегося ударами клапанов ГРМ о седла. Результаты аналогичного исследования на отсеке ОЧН 18/22 (рис. 6) косвенно подтвердили этот вывод. При этом наблюдалось некоторое расхождение по фазам между импульсами вибрации и моментами закрытия клапанов.

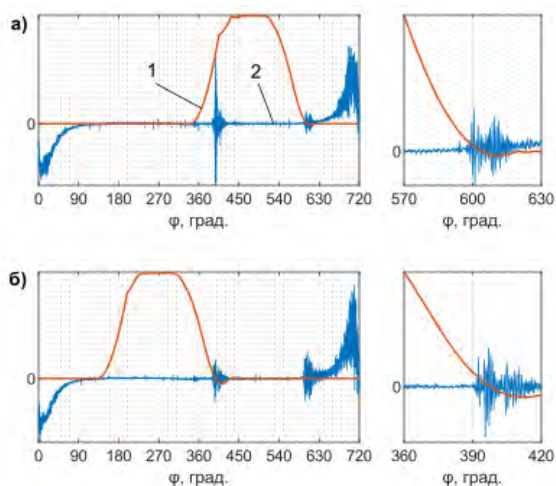


Рис. 6. Скорость изменения давления в цилиндре и перемещение клапанов в течение рабочего цикла отсека ОЧН 18/22: а – датчик линейного перемещения установлен на впускном клапане; б – датчик линейного перемещения установлен на выпускном клапане; 1 – сигнал перемещения клапана; 2 – сигнал скорости изменения давления

На отсеке ОЧН 18/22 запись сигналов осуществлялась при двух вариантах регулировки зазора выпускного клапана – при установке зазоров 0,5 мм и при установке «нулевых» зазоров (то есть при фактическом их отсутствии, когда сохраняется жесткая кинематическая связь между клапаном и кулачковой шайбой). На рис. 7 видно, что при тепловом зазоре 0,5 мм на участке сигнала, охватывающем момент закрытия клапана, наблюдаются сразу два импульса вибрации с промежутком около 8-10 градусов поворота коленчатого вала (ПКВ).

Сопоставление сигналов с датчика скорости изменения давления и с датчика перемещения клапана (см. рис. 6) показало, что событие, принятое за момент закрытия клапана на сигнале с датчика скорости изменения давления, наблюдается раньше, чем на сигнале с датчика линейного перемещения. Среднее расхождение значений φ_z составило около 6 градусов ПКВ для впускного клапана и около 7 градусов ПКВ для выпускного.

На дизеле установки ИТ9-3 запись сигналов осуществлялась в течение 34 последовательных циклов работы двигателя при значениях зазоров

клапанов от 0 мм до 0,5 мм с шагом 0,1 мм. На рис. 8 видно, что при увеличении зазора вибрационные импульсы, вызванные работой клапанного механизма, появляются раньше, что выражается в снижении значений φ_z .

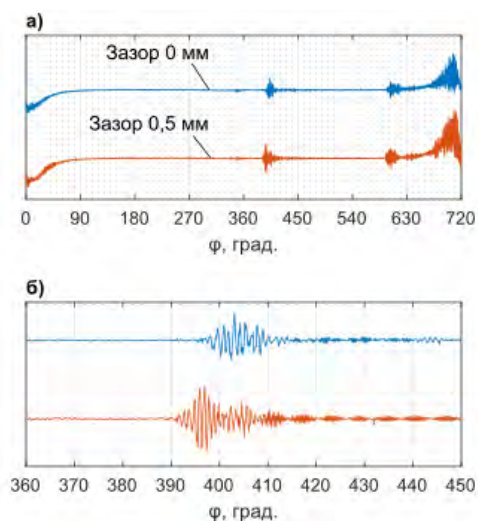


Рис. 7. Фрагменты сигналов скорости изменения давления в цилиндре отсека ОЧН 18/22 при различных значениях теплового зазора выпускного клапана: а – на участке, соответствующем полному рабочему циклу; б – на участке, охватывающем момент закрытия выпускного клапана

Результаты определения φ_z представлены на рис. 9. Видно, что между величиной теплового зазора клапана и фазой закрытия клапана существует линейная зависимость. Максимальное отклонение отдельных значений от линий тренда составило около 2 градусов ПКВ для сигнала скорости изменения давления и около 0,8 градусов для сигнала перемещения клапана. Сравнение графиков для обоих способов определения φ_z показало их хорошую согласованность друг с другом. При этом событие, принятое за момент закрытия клапана на сигнале с датчика скорости изменения давления, наступало позже, чем на сигнале с датчика линейного перемещения, а среднее расхождение значений φ_z для обоих клапанов примерно равно 2 градусам ПКВ, что меньше аналогичного показателя для отсека ОЧН18/22. Такая разница может быть вызвана влиянием ряда факторов, в том числе расстояние между пьезоэлектрическим датчиком и седлами клапанов ГРМ (на дизеле установки ИТ9-3 оно значительно меньше, чем на отсеке ОЧН18/22) и конструкция индикаторного крана в каждом случае. Отклонение полученных графиков от взаимной параллельности можно объяснить как влиянием отдельных значений, обусловленным небольшой выборкой данных (в связи с чем продолжительность записи сигналов следует увеличить), так и допущенной субъективной и инструментальной погрешностью при регулировании тепловых зазоров клапанов.

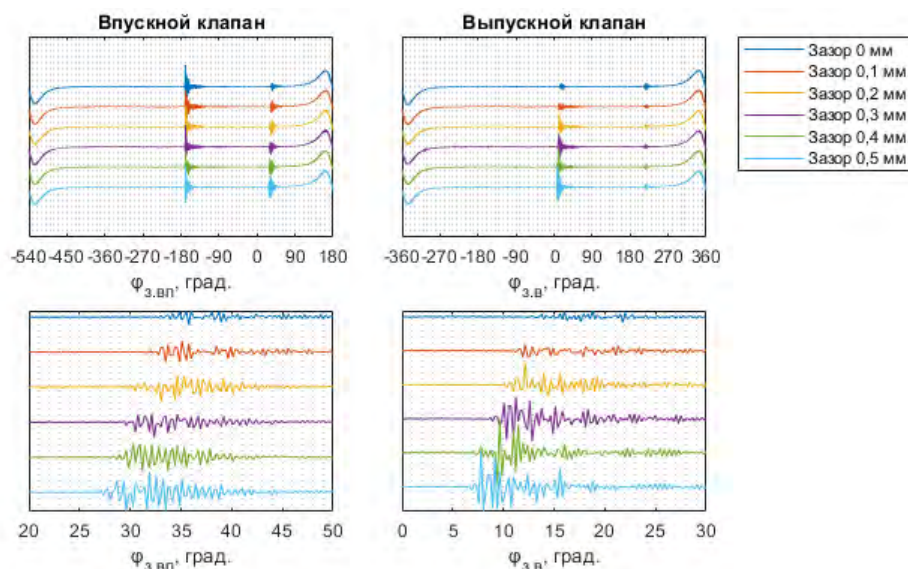


Рис. 8. Фрагменты сигналов скорости изменения давления в цилиндре дизеля установки ИТ9-3 при различных значениях тепловых зазоров клапанов: $\varphi_{з.вп}$ – угол запаздывания закрытия впускного клапана; $\varphi_{з.в}$ – угол запаздывания закрытия выпускного клапана

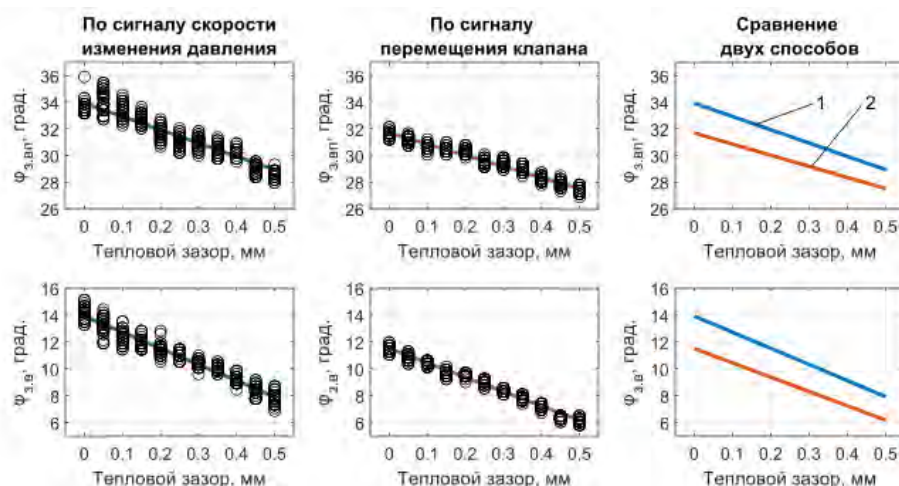


Рис. 9. Графики зависимости φ_z от величины тепловых зазоров клапанов ГРМ дизеля установки ИТ9-3, определенные двумя способами: 1 – по сигналу скорости изменения давления; 2 – по сигналу перемещения клапана

Анализ представленных выше результатов показывает, что высокочастотная составляющая сигнала на выходе исследуемого измерительного канала по своим фазовым и частотным характеристикам идентична сигналу виброакселерометра. При этом разброс значений при определении угла ПКВ, соответствующего закрытию клапанов ГРМ, по предложенному алгоритму не превышает 2 градусов. Имеющее место расхождение значений углов закрытия клапанов, определенное по предложенному алгоритму и с помощью датчика линейного перемещения, может быть учтено при практической реализации метода.

Заключение

Получение индикаторной диаграммы на основе численного интегрирования сигнала скорости изменения давления с пьезоэлектрического датчика давления не уступает по точности общепринятому подходу – применению интегрирующих усилителей

заряда. Расхождение давления на индикаторных диаграммах, полученных экспериментально разными способами, не превышает 4% при условии, что частота дискретизации сигнала скорости изменения давления составляет 20 кГц или выше. Практическое применение предлагаемого подхода в системах диагностики дизелей обладает рядом преимуществ, среди которых:

- простота схемотехники электронного преобразователя сигнала, не требующая трудоемких настроек и обеспечивающая низкую стоимость электронной части индикатора;
- расширение функциональных возможностей диагностической системы как за счет возможности диагностирования клапанного механизма газораспределения по высокочастотной составляющей измеряемого сигнала, так и за счет применения известных диагностических критериев, определяемых непосредственно анализом сигнала скорости изменения давления.

Литература

1. Ватолин, Д. С. Системы контроля технического состояния судовых ДВС / Д. С. Ватолин // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 3-1(45). – С. 87-90.
2. Окунев, В. Н. Современные системы диагностики и мониторинга технического состояния судовых дизелей / В. Н. Окунев, Д. Е. Бурков // Морская радиоэлектроника. – 2010. – № 3-4(33-34). – С. 40-43.
3. Лашко, В. А. Получение индикаторной диаграммы при асинхронном измерении сигнала давления / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. – Двигателестроение, 2007. – № 4(230). – С. 33-37.
4. Конькова, И. Д. Термодинамические методы коррекции абсолютного давления в цилиндре ДВС / И. Д. Конькова, А. Ю. Коньков, А. И. Трунов // Вестник Института тяги и подвижного состава. – 2015. – №. 11. – С. 45-49.
5. Коньков, А. Ю. Диагностирование неплотности цилиндра дизеля по результатам измерения скорости изменения давления / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, И. Д. Конькова, Ю. А. Давыдов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2018. – №4(51). – С. 9-16.
6. Bueno A. V., Velásquez J. A., Milanez L. F. "A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis." Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 8. 2009, pp. 1657-1675.
7. José M. Luján, Vicente Bermúdez, Carlos Guardiola, Ali Abbad. "A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal." Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 24, issue 7, 2010, pp. 2261-2275.
8. Коньков, А. Ю. Экспериментальная проверка способа индицирования дизеля по данным асинхронного измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, К. К. Демаков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2023. – № 3(70). – С. 7-18.
9. Конькова, И. Д. Диагностирование тепловозного дизеля по сигналу скорости изменения внутрицилиндрового давления : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Конькова Ирина Дмитриевна ; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. - Хабаровск, 2020. - 154 с. – Библиогр.: с. 132–146. – Текст : непосредственный.
10. Sensors for combustion analysis : Product catalog [Электронный ресурс] // AVL. Режим доступа URL: https://www.avl.com/documents/10138/0/Sensorenkatalog2018_web.pdf/4453ec83-b818-42e4-8218-f02bb91f5943.
11. Демаков, К. К. Экспериментальное исследование способа диагностики дизеля на основе измерения производной внутрицилиндрового давления / К. К. Демаков, А. Ю. Коньков // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 1. – С. 22-26.
12. Гриценко, А. В. Виброакустический контроль газораспределительного механизма ДВС / А. В. Гриценко, Н. Машрабов, С. А. Барышников [и др.] // АПК России. – 2019. – Т. 26, № 2. – С. 203-215.
13. Гриценко, А. В. Исследование параметров работы газораспределительного механизма при виброакустическом контроле в режиме тестового диагностирования / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. С. Балясников // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3(47). – С. 65-73.
14. Лашко, В. А. Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. – Двигателестроение, 2007. – № 3(229). – С. 34-38.
15. Конькова, И. Д. Математическая модель моторного цикла дизеля и ее программная реализация в среде Simulink Matlab / И. Д. Конькова, Ю. А. Давыдов, А. Ю. Коньков // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – №5. – С. 73-81.
16. Конькова И. Д. Влияние режима и технического состояния тепловозного дизеля на показатель политропы сжатия / И. Д. Конькова, Ю. А. Давыдов, А. Ю. Коньков // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 6. – С.81-88.

References

1. Vatolin D. S. Sistemy kontrolja tehničeskogo sostojanija sudovyh DVS [Technical condition monitoring systems of ship's ICE]. Morskie intellektual'nye tehnologii, 2019, № 3-1(45), S. 87-90.
2. Okunev V. N., Burkov D. E. Sovremennye sistemy diagnostiki i monitoringa tehničeskogo sostojanija sudovyh dizelej [Modern systems of diagnostics and monitoring of technical condition of marine diesel engines]. Morskaja radioelektronika, 2010, № 3-4(33-34), S. 40-43.
3. Lashko V. A., Kon'kov A. Yu. Polucheniye indikatornoy diagrammy pri asinkhronnom izmerenii signala davleniya [Obtaining an indicator diagram for asynchronous measurement of the pressure signal]. Dvigatelistroyeniye, no. 4 (230), 2007, pp. 33-37.
4. Kon'kova I. D., Kon'kov A. Yu., Trunov A. I. Termodinamicheskiye metody korrektsii absol'yutnogo davleniya v tsilindre DVS [Thermodynamic methods of correction of the absolute pressure in the cylinder of the internal combustion engine]. Vestnik Instituta tyagi i podvizhnogo sostava, 2015, no. 11, pp. 45-49.
5. Kon'kov A. Yu., Trunov A. I., Kon'kova I. D., Davydov Yu. A. Diagnostirovaniye neplotnosti tsilindra dizelya po rezultatam izmereniya skorosti izmeneniya davleniya [Diagnosing the leakiness of the diesel cylinder based on the results of measuring the rate of pressure change]. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018, no. 4 (51), pp. 9-16.
6. Bueno A. V., Velásquez J. A., Milanez L. F. "A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis." Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 8. 2009, pp. 1657-1675.

7. José M. Luján, Vicente Bermúdez, Carlos Guardiola, Ali Abbad. "A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal." Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 24, issue 7, 2010, pp. 2261-2275.
8. Kon'kov A. Yu., Trunov A. I., Demakov K. K. Jeksperimental'naja proverka sposoba indicirovaniya dizelja po dannym asinhronnogo izmerenija skorosti izmenenija vnutricilindrovogo davlenija [Experimental test of a diesel indication method based on asynchronous measurement of the rate of in-cylinder pressure]. Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2023, No. 3 (70), pp. 7-18.
9. Konkova I. D. Diagnostirovaniye teplovoznogo dizelya po signalu skorosti izmenenija vnutricsilindrovogo davleniya [Diagnosis of diesel locomotives based on the signal of the rate of change of internal cylinder pressure]: spetsialnost 05.22.07 "Railway rolling stock, train traction and electrification" : dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Khabarovsk, FESTU, 2020, 154 s.
10. Sensors for combustion analysis : Product catalog [electronic resource] // AVL. URL access mode: https://www.avl.com/documents/10138/0/Sensorenkatalog2018_web.pdf/4453ec83-b818-42e4-8218-f02bb91f5943.
11. Demakov K. K., Kon'kov A. Yu. Jeksperimental'noe issledovanie sposoba diagnostiki dizelja na osnove izmerenija proizvodnoj vnutricilindrovogo davlenija [Experimental study of a diesel diagnosis method based on measuring in-cylinder pressure derivative]. Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke, 2023, T. 1, pp. 22-26.
12. Gricenko A. V., Mashrabov N., Baryshnikov S. A. et al. Vibroakusticheskij kontrol' gazoraspredelitel'nogo mehanizma DVS [Vibroacoustic control of the internal combustion engine gas distribution mechanism]. APK Rossii, 2019, T. 26, no. 2, pp. 203-215.
13. Gricenko A. V., Glemba K. V., Baljasnikov A. S. Issledovanie parametrov raboty gazoraspredelitel'nogo mehanizma pri vibroakusticheskom kontrole v rezhime testovogo diagnostirovaniya [Investigation of operational parameters of a gas distribution mechanism under vibroacoustic control in testing mode]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija, 2020, № 3(47), S. 65-73.
14. Lashko V. A., Kon'kov A. Yu. Raschetnyy metod korrektsii deystvitelnogo polozheniya VMT pri inditsirovanii DVS [Calculation method for correcting the actual position of the TDC when indicating the internal combustion engine]. Dvigatelistroyeniye, 2007, no. 3 (229), pp. 34-38.
15. Konkova I. D., Davydov Yu. A., Kon'kov A. Yu. Matematicheskaya model motornogo tsikla dizelya i yeye programmaya realizatsiya v srede Simulink Matlab [A mathematical model of the diesel engine cycle and its software implementation in Simulink Matlab]. Vestnik transporta Povolzhya, 2018, No. 5., pp. 73-81.
16. Konkova I. D., Davydov Yu. A., Kon'kov A. Yu. Vliyaniye rezhima i tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznogo dizelya na pokazatel politropy szhatiya [The influence of the mode and technical condition of locomotive diesel on the compression polytrope indicator]. Vestnik transporta Povolzhya, 2019, No. 6, pp. 81-88.

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

Коньков Алексей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспорт железных дорог», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, e-mail: akonkov1964@gmail.com

Aleksey Yu. Konkov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, 47 Seryshev St, Khabarovsk, 680021, Russian Federation, e-mail: akonkov1964@gmail.com

Демаков Константин Константинович, ассистент кафедры «Транспортно-технологические комплексы», аспирант, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, e-mail: toyotafanat@mail.ru

Konstantin K. Demakov, assistant of the Department of Transport and Technological Complexes, PhD student, Far Eastern State Transport University, 47 Seryshev St, Khabarovsk, 680021, Russian Federation, e-mail: toyotafanat@mail.ru

Трунов Антон Игоревич, кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: a_n_t_r_u_n@mail.ru

Anton I. Trunov, Ph.D (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Industrial Engineering, Pacific State University, 136 Tikhookeanskaya St, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: a_n_t_r_u_n@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.04.2024

Научная статья

УДК 621.313.322-843.6:681.552

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.017>**Имитационное моделирование экстремальных режимов судового пропульсивного комплекса с винтом регулируемого шага**Равин А.А.¹ ravinli@mail.ru, Хруцкий О.В.¹ obx47@mail.ru, Мицуков С.С.¹ mitsykoff@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Специфической особенностью главного судового дизеля является наличие ограничительной характеристики, защищающей дизель от перегрузки по моменту. При экстремальных режимах крутизна винтовой характеристики возрастает, и автоматика, защищающая дизель от перегрузки, ограничивает диапазон режимов и величину движущей (или тормозящей) силы, создаваемой пропульсивным комплексом. В статье рассматриваются результаты имитационного моделирования экстремальных режимов движения судна – движение в ледяном поле и режим экстренного торможения. В качестве инструмента исследования использована компьютерная модель пропульсивного комплекса танкера ледового класса, оборудованного реверсивным малооборотным дизелем и винтом регулируемого шага. Показана возможность обеспечения оборотов дизеля и упора гребного винта, достаточных для преодоления сопротивления ледового поля путём последовательного уменьшения шага винта. В режиме экстренного торможения судна показана предпочтительность способа торможения путем перекладки лопастей ВРШ по сравнению с применением реверса двигателя и установлена возможность получения минимальных значений времени торможения и выбега судна за счет выбора оптимальной команды на перекладку лопастей ВРШ.

Ключевые слова: пропульсивный комплекс, винт регулируемого шага, защита двигателя от перегрузки по моменту

Для цитирования: Равин А.А., Хруцкий О.В., Мицуков С.С. Имитационное моделирование экстремальных режимов судового пропульсивного комплекса с винтом регулируемого шага Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 136—144. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.017

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.017>**Simulation modeling of extreme ship conditions propulsion complex with adjustable pitch propeller**Alexander A. Ravin¹ ravinli@mail.ru, Oleg V. Khrutsky¹ obx47@mail.ru,Sergej S. Mizukov¹ mitsykoff@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Annotation. A specific feature of the main marine diesel engine is the presence of a limiting characteristic that protects the diesel engine from torque overload. Under extreme conditions, the steepness of the propeller characteristic increases, and the automation that protects the diesel engine from overload limits the range of modes and the magnitude of the driving (or braking) force created by the propulsion complex. The article discusses the results of simulation modeling of extreme modes of vessel movement - movement in an ice field and emergency braking mode. As a research tool, a computer model of the propulsion complex of an ice-class tanker equipped with a reversible low-speed diesel engine and an adjustable pitch propeller was used. The possibility of ensuring diesel engine speed and propeller thrust sufficient to overcome the resistance of the ice field by successively reducing the propeller pitch is shown. In the mode of emergency braking of a vessel, the preference of the method of braking by repositioning the rotating propeller blades is shown in comparison with the use of engine reverse, and the possibility of obtaining minimum values of the braking time and the vessel's run-out is established by choosing the optimal command to reposition the rotating propulsion propeller blades.

Key words: propulsion complex, adjustable pitch propeller, engine overload torque protection

For citation: Alexander A. Ravin, Oleg V. Khrutsky, Sergej S. Mizukov. Simulation modeling of extreme ship conditions propulsion complex with adjustable pitch propeller 2024. № 2 part 1, P. 136—144. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.017

Введение

Графическим отображением диапазона допустимых режимов работы главного судового дизеля в координатах: частота вращения – мощность является зона, ограниченная слева оборотами холостого хода, справа – максимально допустимыми оборотами (110% от номинальных), снизу – минимально устойчивой мощностью и справа – ограничительной характеристикой дизеля по моменту (рис.1). Соотношения частоты вращения

гребного винта и мощности главного двигателя отображаются графиком, который называется винтовой характеристикой.

При нормальном режиме использования пропульсивного комплекса (движение судна вперёд с постоянной скоростью на свободной воде и при отсутствии дополнительного сопротивления, обусловленного встречным течением, буксировкой другого судна, движением в ледяном поле и т.п.) винтовая характеристика располагается внутри зоны допустимых режимов работы главного двигателя

(кривая 1 на рис. 1). В экстремальных режимах (например, при движении судна в ледяном поле или при экстренной остановке судна) увеличивается мощность и момент, которые требуются для вращения гребного винта с заданной частотой.

Соответственно увеличивается и крутизна винтовой характеристики (кривая 2).

Если она при этом пересекает ограничительную характеристику дизеля ((кривая 3), система автоматики, защищающая двигатель от перегрузки по моменту, не позволит увеличить частоту вращения больше той, которая соответствует координате точки пересечения.

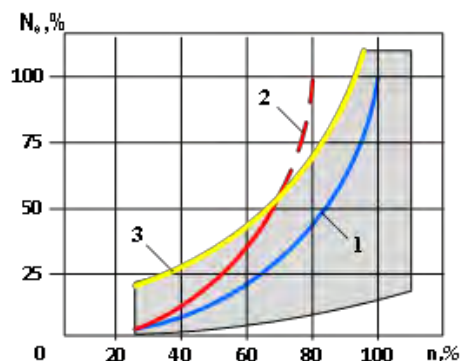


Рис. 1 Характеристики пропульсивного комплекса

Ограничение диапазона изменения частоты вращения гребного винта ограничивает и диапазон изменения упора, создаваемого винтом, и, как следствие, снижает эффективность использования пропульсивного комплекса в экстремальных режимах. Если судно оборудовано винтом регулируемого шага (ВРШ), у судоводителя есть возможность избежать

перегрузки главного двигателя путём оптимизации управления шагом винта при экстремальных режимах движения судна.

В статье рассматриваются результаты имитационного моделирования указанных процессов при движении судна в ледяном поле и при экстренном торможении судна.

1. Объект и методика исследований

В качестве инструмента исследования использована компьютерная модель пропульсивного комплекса танкера ледового класса, оборудованного малооборотным главным дизелем и винтом регулируемого шага (рис 2)



Рис.2 Танкер ледового класса

Дедвейт 4700 тонн, мощность двигателя 8360 кВт, номинальные обороты двигателя 127 об/мин, скорость судна 14,3 узл., шаг винта: - 0,9 — + 0,9м

Рабочее окно и структура математической модели пропульсивного комплекса показаны на рисунках 3 и 4.

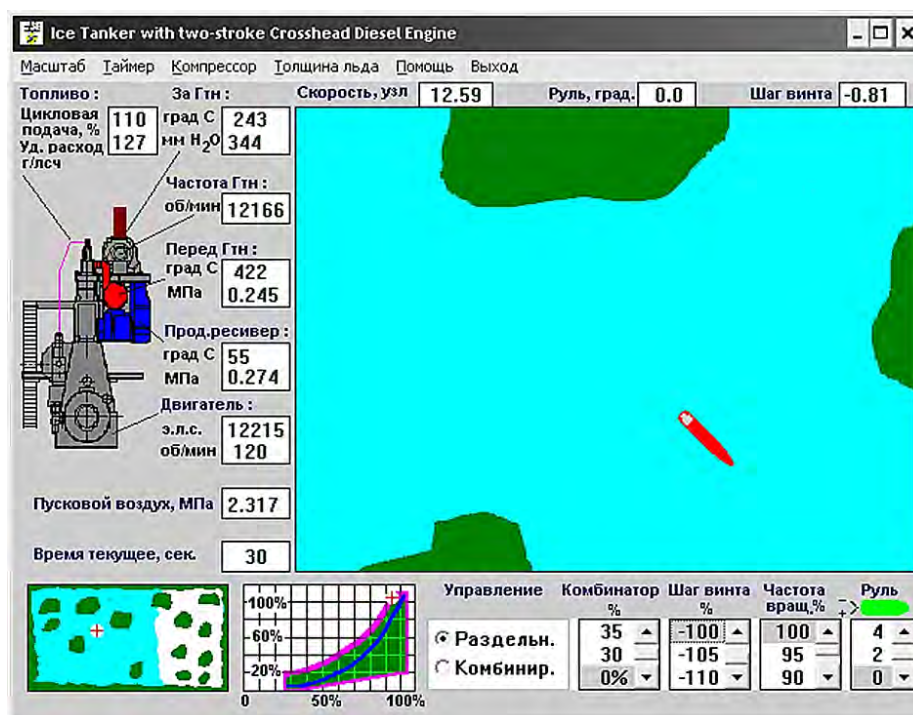


Рис. 3 Рабочее окно компьютерной модели

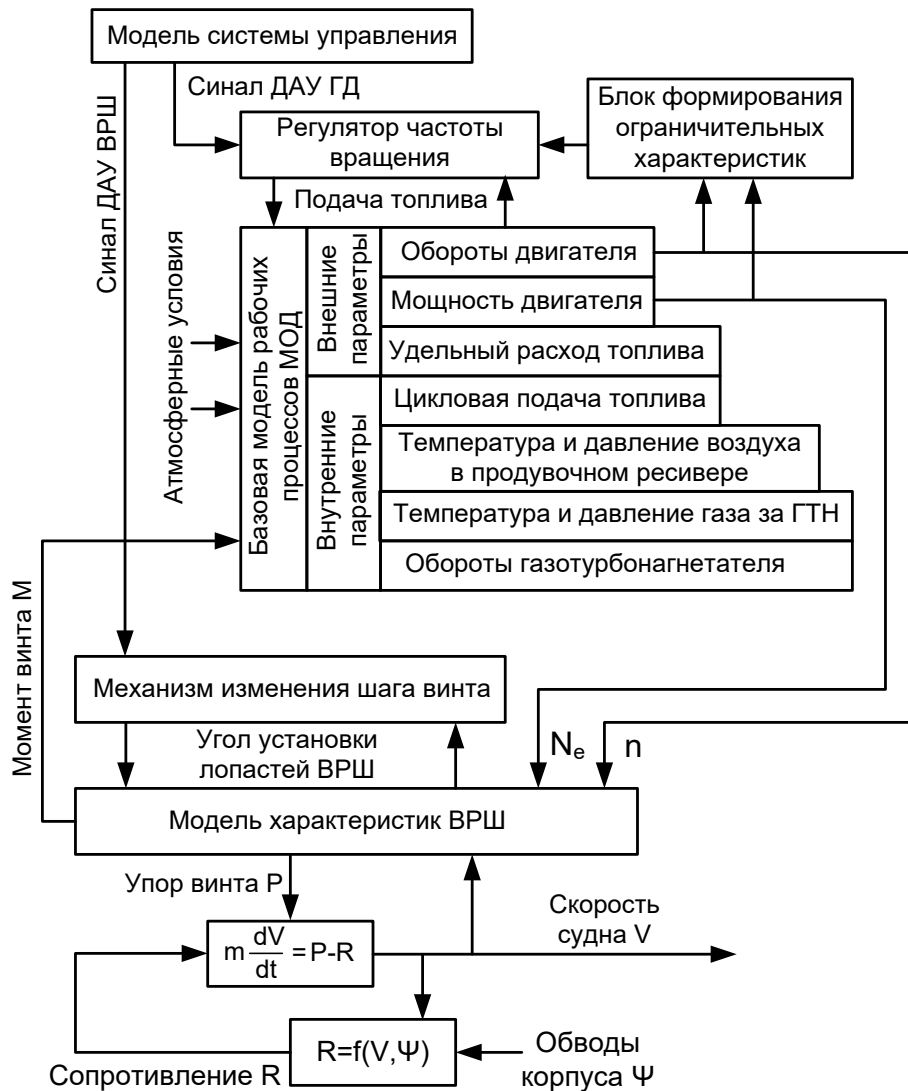


Рис.4 – Структура модели двигательного-двигательного комплекса

Модель имитирует гидродинамические свойства корпуса судна, статические и динамические характеристики главного двигателя, винта регулируемого шага и систем ДАУ главным двигателем и механизмом изменения шага винта.

2. Моделирование режимов движения судна в ледяном поле

Для продвижения судна в ледяном поле движитель должен создавать достаточный для разрушения льда упор, который зависит от частоты вращения и шага винта. Если судно оборудовано винтом фиксированного шага, возможность увеличения упора ограничена тем, что система защиты двигателя от перегрузки по моменту не позволяет развить частоту вращения больше той, при которой винтовая характеристика с увеличенной крутизной пересекает ограничительную характеристику дизеля (рис. 1).

В таблице 1 представлены соответствующие изменения положения командного органа системы дистанционного управления режимом главного двигателя (КО), шага винта (Н), частоты вращения винта (n), мощности дизеля (N) и скорости судна V

Таблица 1
Изменение параметров пропульсивного комплекса с фиксированным шагом винта

Режим	1	2	3	4	5	6
КО, %	0	50	70	80	90	100
Н, м	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
n, об/мин	0	63	84	84	84	84
N, квт	0	1711	3952	3953	3953	3953
V, узл.	0	0	0	0	0	0

Серым цветом выделены режимы, рабочие точки которых расположены на тех участках винтовой характеристики, которые находятся внутри зоны разрешённых режимов работы дизеля.

Жёлтым цветом выделен режим, соответствующий точке пересечения винтовой характеристики и ограничительной характеристики дизеля по моменту.

Белым цветом отмечены режимы, выполнение которых заблокировано системой защиты дизеля от

перегрузок. В результате этой блокировки дизель не может развить частоту вращения и мощность, которые достаточны для разрушения льда, и судно не двигается.

Обеспечить возможность увеличения частоты вращения дизеля в соответствии с командами системы ДАУ можно путём последовательного уменьшения шага винта и крутизны винтовой характеристики. При этом надо иметь в виду, что уменьшение шага винта негативно влияет на величину упора.

Это противоречие требует решения оптимизационной задачи. Оптимальными будут те значения шага винта, которые обеспечат расположение рабочих точек на пересечении винтовых характеристик и ограничительной характеристики дизеля (таблица 2).

Таблица 2

Изменение параметров пропульсивного комплекса с ВРШ

Режим	1	2	3	4	5	6
КО, %	0	50	70	80	90	100
Н, м	0,9	0,9	0,9	0,81	0,81	0,77
п, об/мин	0	63	84	101	114	127
N, кВт	0	1711	3952	5246	7047	8404
V, узл.	0	0	0	2,04	3,97	5,1

Подбор оптимального сочетания частоты вращения и шага винта может быть выполнен судоводителем с помощью специальной программы «оптимизатор». Органы управления этой программой показаны в нижней части рабочего окна модели (рис. 4)

Как видно из таблицы 2, оптимизирующий алгоритм позволяет без перегрузки дизеля по моменту развить частоту вращения и мощность двигателя, достаточные для движения судна в ледяном поле.

3. Моделирование режимов экстренного торможения судна

Одним из уроков, извлечённых в результате анализа причин печально знаменитой катастрофы «Титаника», явилось понимание того, что к числу важнейших параметров, влияющих на безопасность мореплавания, следует относить выбег корабля в режиме экстренного торможения, т. е. путь, пройденный судном с момента подачи команды на реверс до его полной остановки, а также время торможения. Недооценка этих характеристик и в наши дни приводит к столкновению кораблей и их навалу на пирсы, опоры мостов и другие препятствия (рис. 5).

Недооценка этих характеристик и в наши дни приводит к столкновению кораблей и их навалу на пирсы, опоры мостов и другие препятствия (рис. 5).



Рис. 5 – Столкновение судов

В связи с ростом тоннажа судов и интенсивности судоходства требования к быстрому реверсированию неуклонно ужесточаются. Реверс судна представляет собой сложный динамический процесс.

Расчетные методы, применяемые для его описания, весьма приближены, поэтому наиболее объективным средством суждения о реверсивных качествах судна является эксперимент – натурный (в процессе приемо-сдаточных испытаний

построенного судна) или имитационный (компьютерное моделирование пропульсивного комплекса в режиме экстренного торможения судна). Основные факторы, определяющие длительность экстренного торможения и выбег судна:

- масса и скорость судна в момент начала торможения – они определяют начальную величину кинетической энергии, которую для

остановки судна необходимо истратить на совершение работы торможения;

- гидродинамические характеристики корпуса, характеристики главного двигателя (дизеля) и движителя (гребного винта фиксированного или регулируемого шага);
- загрузка судна (с одной стороны, судно с грузом имеет большую массу и кинетическую энергию, чем судно, идущее порожнём, и это затрудняет его торможение, но, с другой стороны, увеличение осадки загруженного судна увеличивает гидродинамическое сопротивление корпуса, способствуя его торможению);
- способ торможения – пассивное торможение за счёт гидродинамического сопротивления корпуса при остановленном главном двигателе (ГД), активное торможение путём реверса двигателя или путём разворота в режим заднего хода лопастей винта регулируемого шага (ВРШ);
- режим торможения – характер перевода задающих органов систем ДАУ ГД и ДАУ ВРШ из режима полного переднего хода в режим торможения.

В данном разделе представлены результаты применения компьютерного моделирования для выбора режима управления, оптимального с точки зрения минимизации времени торможения и выбега судна.

В качестве инструмента исследования использована представленная в предыдущем разделе компьютерная модель пропульсивного комплекса судна **3.1 Выбор способа торможения**

Пассивное торможение путём остановки главного двигателя не может рассматриваться в качестве эффективного способа экстренной остановки судна в связи с тем, что квадратичное уменьшение гидродинамического сопротивления корпуса по мере замедления движения судна сильно растягивает «хвост» переходного процесса.

Активное торможение обеспечивает интенсификацию процесса замедления судна за счёт изменения направления упора, создаваемого движителем.

В том случае, если движителем является винт фиксированного шага, реализация этой процедуры требует изменения направления вращения гребного вала либо путём реверса главного двигателя (если он реверсивный), либо переключением в режим заднего хода реверс-муфты редуктора (если таковая имеется в составе главной СЭУ).

Если судно оборудовано винтом регулируемого шага, изменение направления упора может быть обеспечено разворотом лопастей ВРШ в режим заднего хода при сохранении направления вращения гребного вала.

Особенностью используемой модели является намеренная избыточность компоновки СЭУ, обеспечивающая возможность реализации обоих рассмотренных выше способов активного торможения (при том, что для реальных теплоходов не характерно сочетание реверсивного дизеля и ВРШ).

3.2 Выбор режима торможения

Актуальность оптимизации режима торможения обусловлена специфической особенностью

характеристики пропульсивного комплекса с дизелем в .. качестве главного двигателя.

При разнонаправленности скорости судна и упора, создаваемого движителем, крутизна винтовой характеристики возрастает и она «упирается» в ограничительную характеристику дизеля (по моменту) при оборотах, которые существенно меньше номинальных.

Работа дизеля на пониженных оборотах будет снижать величину тормозящего упора и затягивать процесс торможения.

В качестве способа компенсации описанного выше негативного эффекта предлагается вместо, казалось бы, очевидных, переключений командных органов систем дистанционного управления главного двигателя или винта регулируемого шага из положения полного переднего хода в положение полного заднего хода, применить задание частичных положений реверсивных органов.

Проверка эффективности этого предложения выполнялась методом имитационного моделирования режимов торможения судна с помощью описанной выше компьютерной модели.

3.3 Результаты моделирования торможения судна путём изменения направления вращения гребного вала

Начальный этап моделирования заключался в разгоне «судна» до номинальной скорости переднего хода с номинальной частотой вращения главного двигателя. Далее в систему ДАУ главного двигателя подавалась команда на перевод главного двигателя из режима полного переднего хода в режим полного заднего хода. В течение переходного процесса регистрировалось время, эффективная мощность N , частота вращения дизеля n и скорость судна V (вплоть до его остановки). Результаты представлены на рис.6

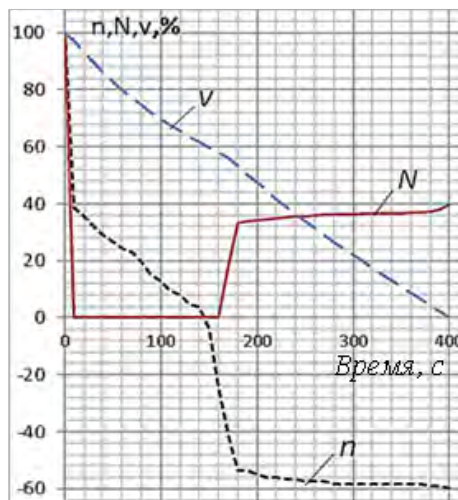


Рис. 6 – Переходные процессы при реверсировании гребного вала

Как видно из графика, скорость остановки судна произошла через 400 секунд после подачи коанды на реверс двигателя. Выбег определялся путём интегрирования зависимости $V=f(t)$:

$$S = \int_0^T V(t)dt = 1450 \text{ (м)} \quad (1)$$

Анализ зависимости $n=f(t)$ свидетельствует о том, что процесс торможения судна можно разделить на две фазы: пассивную (первые 150 секунд), когда двигатель вращается в прежнем направлении, и активную (от 150 до 400 секунд), когда двигатель, раскручиваясь в противоположном направлении, создаёт тормозящий упор.

Пассивная фаза несколько затянута в связи с тем, что, несмотря на сброс в течение нескольких секунд подачи топлива и соответствующее падение мощности (см. график $N=f(t)$), двигатель медленно замедляет частоту вращения с 40% переднего хода до 0 в связи с подкручиванием винта набегающим потоком. Это запоздалое наступление активной фазы негативно сказывается на эффективности торможения судна.

Другим фактором, влияющим на процесс замедления судна уже в активной фазе, являются пониженные по сравнению с номинальными значения частоты вращения и мощности двигателя: мощность не выше 40% и частота вращения не выше 60% заднего хода (см. соответствующие графики). Причиной этого ограничения, как уже было отмечено ранее, является увеличение крутизны винтовой характеристики в связи с тем, что, что вращение гребного винта в режиме заднего хода при продолжающемся (по инерции) движении судна вперёд значительно изменяет режим взаимодействия винта с потоком воды, в связи с чем увеличиваются момент сопротивления винта и мощность, затрачиваемая на его вращение.

Подавление влияния этой негативной особенности может быть достигнуто за счёт уменьшения крутизны винтовой характеристики путём разгрузки винта. Но для этого в состав пропульсивного комплекса судна должен входить винт регулируемого шага.

3.4 Результаты моделирования торможения судна путём реверса ВРШ

На первом этапе моделировался режим перекадки лопастей винта из положения полного переднего хода (шаг 100%) в положение полного заднего хода.

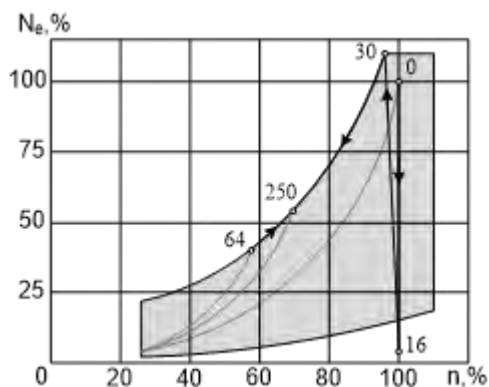


Рис. 8 – Перемещение рабочей точки на характеристике дизеля при торможении судна изменением шага ВРШ от +100% до -100% (обозначения точек соответствуют времени в секундах от начала торможения)

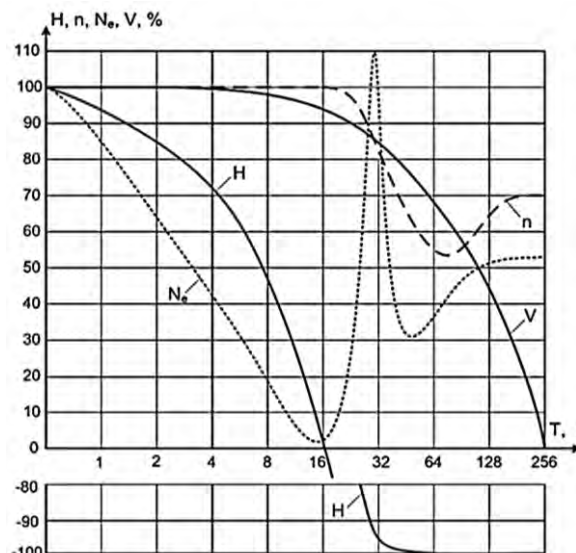


Рис. 7 – Переходные процессы при изменении шага винта: +100% → -100%

Полученные переходные процессы могут быть разделены на две стадии.

Стадия **пассивного торможения** под действием гидродинамического сопротивления корпуса длится от подачи команды до установки лопастей винта в нейтральное положение (на графике $N=f(T)$ видно, что нулевой шаг устанавливается примерно на 16-й секунде. При этом происходит уменьшение момента винта, а вместе с ним и потребляемой мощности двигателя. Частота вращения двигателя удерживается регулятором на номинальном уровне. Упор винта направлен вперёд, но постепенно уменьшается до нуля. Судно продолжает двигаться вперёд, постепенно замедляя скорость в результате уменьшения упора.

После перехода лопастей ВРШ через нейтральное положение начинается этап **активного торможения** под действием упора винта, поменявшего своё направление. При этом быстро возрастает момент сопротивления винта до величины, превышающей номинальное значение, поскольку судно продолжает по инерции двигаться вперёд при винте, работающем на задний ход. Крутизна винтовой характеристики при этом резко возрастает (в таких случаях принято говорить, что винт становится слишком «тяжёлым»).

Регулятор, пытаясь удержать заданное значение частоты вращения дизеля при быстро возрастающем моменте сопротивления винта, резко увеличивает подачу топлива и мощность двигателя. При достижении предельно допустимой мощности дизеля (110%) включается система автоматической защиты двигателя от перегрузки, которая «спускает» режимную точку вдоль предельной характеристики дизеля до положения, при котором эта характеристика пересекается с «тяжёлой» винтовой характеристикой (точка 64 на рис.8).

При этом соответственно уменьшаются обороты и мощность дизеля. По мере постепенного замедления судна крутизна винтовой характеристики уменьшается, и режимная точка перемещается к положению 250.

Наблюдающееся при этом довольно длительное снижение мощности двигателя снижает и полезную

работу активного торможения судна за счёт направленного назад упора винта и, как следствие, затягивает процесс торможения и увеличивает выбег судна. На следующих режимах моделирования была предпринята попытка снижения негативного влияния «утяжеления» винта при реверсе за счёт уменьшения задаваемого шага винта в режиме заднего хода (табл. 3)

Таблица 3.

**Результаты моделирования
торможения судна переключкой лопастей ВРШ**

Команды на изменение шага винта	Время торможения, с	Выбег, м
+100% → -100%	256	960
+100% → -95%	214	790
+100% → -90%	183	670
+100% → -85%	168	630
+100% → -80%	174	650
+100% → -75%	185	700

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для сокращения времени торможения и выбега судна вовсе не следует сразу переключать лопасти ВРШ в положение максимального заднего хода, а предпочтительно выбрать режим, уменьшающий влияние перегрузки винта и двигателя по моменту.

В частности, для данного судна при реверсе с режима полного хода предпочтительным оказался режим изменения шага винта «100% → -85%»

Заключение

В результате имитационного моделирования экстремальных режимов движения судна можно сделать вывод, что защищённая от перегрузок по моменту работа главного двигателя и повышение эффективности использования судового пропульсивного комплекса с ВРШ, могут быть обеспечены путём оптимизации соотношения частоты вращения и шага винта и правильного выбора команды на реверс винта регулируемого шага.

Литература

- Гардинер Р., Ван дер Ват Д. Загадка «Титаника» - Москва : Вече, 1997. - 377 с.
- Скрягин Л. Н. 300 катастроф, которые потрясли мир: [Катастрофы на воде]- М.: Современник. 1996 - 65 с.
- Шеннон Роберт. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. М.: Мир, 1978. — 424с.
- Пытьев Ю.П. Методы имитационного моделирования информационно-измерительных систем. М.: МАИК Наука, 2004. — 400 с.
- Строгалева В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. - МГТУ им. Баумана, 2008. 205с.
- Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование [Simulation Modeling and Analysis]. СПб.: Издательство: Питер, 2004. — 848 с.
- Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем. Часть 1. Математические основы. Учебное пособие. Минск: Изд. БГТУ, 2009. — 263 с.
- Духанов А. В. Медведева О.Н. Имитационное моделирование сложных систем. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. — 115 с.
- Правила технической эксплуатации дизелей, раздел 4.4.8. Морское агентство «Транс-сервис». 1974, 48с.
- Правила технической эксплуатации судовых гребных винтов регулируемого шага. Гипрорыбфлот". - СПб.. — 1999, 79 с..
- Берденников А. А. Оптимизация режимов работы судового дизеля с винтом регулируемого шага. Системы управления и обработки информации: научн.техн. сб. /ОАО «Концерн «НПО «Аврора». СПб. 2015. Вып. 30. с. 50–62.
- Исследование характеристик реверса судна. Режим доступа <http://www.stroitelstvo-new.ru/sudostroenie/imk/issledovanie-harakteristik-reversa-sudna.shtml>
- Дитятев, С. Г. Исследование изменений винтовой характеристики судового малооборотного дизеля в эксплуатации: дис. канд. техн. наук: Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1984. — 295с.
- Капран, Л. К. Исследование режимов эксплуатации главного дизеля 5дкрн50/110-2 танкера типа «Калининграднефть» с тремя вариантами гребных винтов / Л. К. Капран, В. В. Маницын, З. П. Старовойтова // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2016. — с. 99 - 110.
- Кацман, Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 222 с.
- Лаврищева, Л. С. Решение оптимизационной задачи для модели гребного винта регулируемого шага в однородном потоке / Л.С. Лаврищева // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. — 2018. — Т. 5(63). Вып. 1. — с. 139-146.
- Мясников, Ю. Н. Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и безопасной эксплуатации морского судна: монография / Ю. Н. Мясников, А. М. Никитин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 136 с.
- Basic Principles of Ship Propulsion. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>.
- Основные принципы движения судов. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>.
- Carlton, J. S. Propeller Performance Characteristics In Marine Propellers and Propulsion / J. S. Carlton. - Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, — 2012. — 3rd ed. — Pp. 79-136.
- Molland, A. Propeller Characteristics. In Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. / A. Molland, S. Turnock, D. Hudson // Cambridge: Cambridge University Press. - 2017. — Pp. 277-312.

22. Молланд А. Характеристики гребного винта. Сопротивление и тяга корабля: практическая оценка тяги корабля. / А. Молланд, С. Тернок, Д. Хадсон // Кембридж: Изд. Кембриджского университета. - 2017. — с. 277-312.
23. Накиса, М. Численное исследование характеристик гребного винта для судна в ограниченной воде / М. Накиса, Ф. Бехрузи, А. Маймун, Р. Самад, Ю.М. Ахмед // Procedia Engineering. — 2017. — Вып. 194. — С. 128-135
24. Стаперсма, Д. Согласование двигательной установки с движителем / Д. Стаперсма, Хк. Вуд // Журнал морской техники и технологий. — 2005. — Вып. 4. — №2.— Стр. 25 - 32.
25. Сазонов К.Е., Каневский Г.И., Клубничкин А.И., Добродеев А.А.. Актуальные вопросы изучения реверса движителей. Труды Крыловского государственного научного центра. Т.4, №402, 2022 с 49 - 64

References

1. Gardiner R., van der Wat D. The mystery of the Titanic - Moscow: Veche, 1997. - 377 p.
2. Skryagin L.N. 300 disasters that shook the world: [Disasters on water] - M.: Sovremennik. 1996 - 65 p.
3. Shannon Robert. Systems simulation: the art and science. M.: Mir, 1978. — 424 p.
4. Pytyev Yu.P. Methods of simulation modeling of information-measuring systems. M.: MAIK Nauka, 2004.— 400 p.
5. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. Simulation modeling. - MSTU im. Bauman, 2008. 205 p.
6. Lowe A., Kelton V. Simulation Modeling and Analysis. St. Petersburg: Publishing house: Peter, 2004. — 848 p.
7. Maksimov I.V. Simulation modeling of complex systems. Part 1. Mathematical foundations. Tutorial. Minsk: Publishing house. BSTU, 2009. — 263 p.
8. Dukhanov A.V. Medvedeva O.N. Simulation modeling of complex systems. Vladimir: Publishing house Vladim. state University, 2010. — 115 p.
9. Rules for the technical operation of diesel engines, section 4.4.8. Maritime agency "Trans-service". 1974, 48 p.
10. Rules for the technical operation of ship's adjustable pitch propellers. Giproybflot, St. Petersburg. 1999, 79 p..
11. Berdennikov A. A. Optimization of operating modes of a marine diesel engine with a variable pitch propeller. Control and information processing systems: scientific. tech. Sat. /JSC Concern NPO Aurora. SPb. 2015. Issue. 30. p. 50–62.
12. Study of the characteristics of the vessel's reverse. Access mode <http://www.stroitelstvo-nov.ru/sudostroenie/imk/issledovanie-harakteristik-reversa-sudna.shtml>
13. Dityatev, S. G. Study of changes in the screw characteristics of a marine low-speed diesel engine in operation: dis. Ph.D. tech. Sciences: L.: LVIMU im. adm. S. O. Makarova, 1984. - 295c.
14. Kapran, L. K. Study of operating modes of the main diesel engine 5dkrn50/110-2 of the Kaliningradneft type tanker with three variants of propellers / L. K. Kapran, V. V. Manitsyn, Z. P. Starovoirova // Scientific works of Dalrybvtuz. — 2016. — p. 99 - 110.
15. Katsman, F. M. Operation of the propulsion complex of a sea vessel / F. M. Katsman. - M.: Transport, 1987. - 222 p.
16. Lavrishcheva, L. S. Solution of the optimization problem for the model of a controlled pitch propeller in a homogeneous flow / L. S. Lavrishcheva // Bulletin of St. Petersburg State University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. - 2018. - T. 5(63). Vol. 1. - p. 139-146.
17. Myasnikov, Yu. N. Characteristics of the propulsion complex in the problem of ensuring energy-efficient and safe operation of a sea vessel: monograph / Yu. N. Myasnikov, A. M. Nikitin. - St. Petersburg: Publishing house GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. - 136 p.
18. Basic Principles of Ship Propulsion. [Electronic resource]. - Access mode: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>.
19. Basic principles of vessel movement. [Electronic resource]. - Access mode: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>.
20. Carlton, J. S. Propeller Performance Characteristics in Marine Propellers and Propulsion / J. S. Carlton. - Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, - 2012. - 3rd ed. - Pp. 79-136.
21. Molland, A. Propeller Characteristics. In Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. / A. Molland, S. Turnock, D. Hudson // Cambridge: Cambridge University Press. - 2017. — Pp. 277-312.
22. Molland A. Characteristics of the propeller. Ship drag and thrust: practical assessment of ship thrust. / A. Molland, S. Turnock, D. Hudson // Cambridge: Ed. Cambridge University. - 2017. - p. 277-312.
23. Nakisa, M. Numerical study of the characteristics of a propeller for a ship in confined water / M. Nakisa, F. Behruzi, A. Maimun, R. Samad, Yu.M. Ahmed // Procedia Engineering. — 2017. — Issue. 194. - pp. 128-135
24. Stapersma, D. Coordination of the propulsion system with the propulsion device / D. Stapersma, Hk. Wood // Journal of Marine Engineering and Technology. - 2005. - Issue. 4. - No. 2. - Page 25 - 32.
25. Sazonov K.E., Kanevsky G.I., Klubnichkin A.I., Dobrodeev A.A. Current issues in the study of reverse propulsion. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. T.4, No. 402, 2022 pp. 49 - 64

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Равин Александр Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ravinlki@mail

Alexander A. Ravin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ravinlki@mail.ru

Хруцкий Олег Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: obx47@mail.ru

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: obx47@mail.ru

Мицуков Сергей Сергеевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mitsykoff@gmail.com

Sergej S. Mizukov, graduate student, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: mitsykoff@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.05.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.05.2024.

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

Научная статья

УДК 681.883.458

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.018>

Определение точности измерения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов

Дикарев А.В.¹ a.dikarev@unavlab.com, Дмитриев С.М.¹ s.dmitriev@unavlab.com,
Кубкин В.А.¹ v.kubkin@unavlab.com, Василенко А.В.¹ a.vasilenko@unavlab.com,
Абеленцев А.П.¹ a.abelentsev@unavlab.com

¹Лаборатория подводной связи и навигации», г. Москва

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования точности определения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов uWave в условиях ледового эксперимента в мелком водоёме. Проведены две независимые проверки: определение фактической скорости звука на основе относительных измерений, и определение дальностей на основе скорости звука, вычисленной по измерению температуры встроенными в модемы датчиками. Общий размер выборки составляет 1260 измерений времени распространения сигнала, выполненных в 10 различных взаимных расположений двух объектов. Проведён анализ источников погрешностей, в ходе которого, в частности, выявлена линейная зависимость роста среднеквадратичного отклонения измерений времени распространения с дальностью. В качестве источника указан эффект удлинения траекторий лучей в виду нелинейности распространения звука в среде. Экспериментальная проверка точности определения времени распространения сигнала и наклонной дальности между модемами uWave показала, что среднеквадратичное отклонение имеет порядок 0.1% от дальности.

Ключевые слова: гидроакустика, гидроакустический модем, измерение дальности, скорость звука.

Для цитирования: Дикарев А.В., Дмитриев С.М., Кубкин В.А., Василенко А.В., Абеленцев А.П. Определение точности измерения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 145—154. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.018>

Determining the accuracy of range measurements between underwater objects using underwater acoustic modems

Alexander V. Dikarev¹ a.dikarev@unavlab.com, Stanislav M. Dmitriev¹ s.dmitriev@unavlab.com,
Vitaliy A. Kubkin¹ v.kubkin@unavlab.com, Andrey V. Vasilenko¹ a.vasilenko@unavlab.com,
Arthur P. Abelentsev¹ a.abelentsev@unavlab.com

¹Underwater communication & navigation laboratory, LLC

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the accuracy of measurement of the distance between underwater objects using uWave underwater acoustic modems under the conditions of an ice experiment in a shallow water body. Two independent tests were carried out: determining the actual speed of sound based on relative measurements, and determining ranges based on the speed of sound calculated from temperature measurements by sensors built into modems. The total sample size is 1260 signal propagation time measurements taken at 10 different relative positions of the two objects. An analysis of the sources of errors was carried out, during which, in particular, a linear dependence of the increase in the standard deviation of propagation time measurements with range was revealed. The source indicated is the effect of lengthening ray trajectories due to the nonlinearity of sound propagation in the medium. An experimental test of the accuracy of determining the signal propagation time and slant range between uWave modems showed that the standard deviation is on the order of 0.1% of the range.

Key words: underwater acoustic, underwater acoustic modem, slant range measurement, speed of sound.

For citation: Alexander V. Dikarev, Stanislav M. Dmitriev, Vitaliy A. Kubkin, Andrey V. Vasilenko, Arthur P. Abelentsev. Determining the accuracy of range measurements between underwater objects using underwater acoustic modems, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 145—154. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.018

Введение

Измерение дальности (или разности дальностей) необходимо для решения навигационных задач [1], а также для работы некоторых специализированных сетевых протоколов [2], использующих информацию о взаимном расположении или удалении абонентов

друг от друга для эффективной маршрутизации и избежания коллизий.

Для мобильных подводных объектов определение дальности, основанное на измерении времени распространения сигнала, является наиболее часто применимым: альтернативой являются различные вариации одометрических

методов, методов, основанных на числении пути, известному закону затухания сигнала, известному закону изменения потенциала поля (например, измерение глубины по давлению столба жидкости). Все эти альтернативы, как правило, имеют серьезные ограничения по точности или могут применяться в узком диапазоне условий и в целом не отвечают требованиям универсальности.

Вопросы исследования средств измерения дальности между мобильными подводными объектами и особенно анализа ошибок измерений на данный момент представлены относительно небольшим числом работ [3] [4]. Косвенно, анализ точности определения дальности проводится в работах, посвященных навигационным системам, например [5], [6] и [7].

Факторы, влияющие на снижение точности определения расстояния между подводными мобильными объектами, можно разделить на внешние, связанные с условиями прохождения сигнала через среду, и внутренними, связанными с несовершенством оборудования: его аппаратной и программной составляющих.

При этом, вклад тех или иных факторов, как внутренних, так и внешних зависит от конкретного способа измерения времени распространения.

1. Методы измерения времени распространения

Базовым является метод «запрос-ответ», при котором инициирующий измерение абонент, посылает запросный сигнал и определяет удвоенное время распространения по получении ответного сигнала от запрашиваемого абонента. Собственно время распространения в одну сторону в данном случае определяется по формуле (1):

$$t_p = (t_{oa} - t_{or} - t_d) / 2 \quad (1)$$

где t_p – искомое время распространения сигнала, t_{or} и t_{oa} – зафиксированные по часам запрашивающего абонента времена излучения запросного сигнала и принятия ответного сигнала соответственно, t_d – фиксированная задержка ответа на стороне запрашиваемого абонента, заведомо большая, чем длительность запросного сигнала и время, требуемое запрашиваемому на принятие решения об успешном приеме и переключении из режима приема в режим передачи.

Данный метод при своей простоте имеет известные недостатки: оба абонента должны иметь как приёмный, так и передающий тракты, а для выполнения одного измерения требуется два успешных приема – как на запрашиваемой, так и на запрашивающей стороне. Это условие является предпосылкой к другим недостаткам. В частности, если запрашивающий абонент обрабатывает ошибочную ситуацию при помощи механизма таймаута, когда следующий запрос может быть выполнен или после успешного завершения предыдущего, или по истечении некоего временного интервала, учитывающего максимально возможное расстояние между абонентами, производительность всей системы обратно зависит от дальности между абонентами, а каждый неудачный прием на любой из сторон, приводит к необходимости выдержки интервала ожидания.

Все источники ошибок при данной схеме вносят свой вклад дважды: и неточность определения времени прихода сигнала приёмником, и

неравномерность хода часов, и нелинейность распространения сигнала в среде.

При таком количестве недостатков, однако, метод имеет и существенные достоинства, некоторые из них могут иметь решающее значение при решении конкретной инженерной задачи.

Например, данная схема является максимально универсальной и не требует никаких подготовительных этапов, неравномерность хода влияет только на длительности транзакции, где характерные времена находятся в диапазоне от миллисекунд до десятков секунд. Что для современных неспециализированных источников тактирования, в среднем имеющих неравномерность хода в диапазоне ± 3 ppm [8], приводит к накоплению ошибки, связанной с неравномерностью хода, порядка 30 мкс (± 4.5 см) на дальности около 7000 м.

Данная схема также является максимально гибкой, так как может быть легко встроена в различные протоколы и механизмы временного разделения, когда расстояние между абонентами измеряется только при выполнении каких-либо условий, присущих той или иной задаче: по расписанию, при активном перемещении и т.п.

Минимальные модификации данной схемы позволяют организовывать взаимное измерение дальности между абонентами, когда ответный сигнал запрашиваемого абонента является запросным сигналом для запрашивающего и при трёх успешных приемах сигнала два абонента измеряют дальности друг до друга. В этом же случае сохраняется схема ведущий-ведомый, и ведомый измеряет дальность до ведущего строго в выделенный для этого момент времени. Такая схема позволяет реализовать взаимную навигацию, как это описано в [9]: при осуществлении трекинга какого-либо подводного объекта, например АНПА, базовая станция, представляющая собой опускаемую с поверхности УКБ антенну, при успешном получении ответа от маяка-ответчика, расположенного на АНПА и информационно с ним сопряженного, посылает сообщение, содержащее, например, вычисленный азимут от АНПА на базовую станцию. Получив это сообщение, маяк-ответчик, во-первых, определяет дальность до базовой станции, а во-вторых, получает курс, двигаясь по которому может выполнить привод.

Две другие схемы определения времени распространения сигнала подразумевают синхронизацию часов абонентов, что, как будет показано ниже, с одной стороны позволяет исключить двойное влияние ошибок, связанных с распространением сигнала в среде, а с другой – вносят накопление ошибки, связанной с неравномерностью хода часов.

В первой схеме фактическое время отправления явно присутствует в сообщении, и получатель может определить дальность до отправителя как разность времени прихода, зафиксированного по его часам, и время отправления, содержащееся в сообщении. Очевидно, что измерение здесь происходит только у получателя. Данная схема так же является достаточно гибкой, и не накладывает никаких ограничений на расписание передачи данных и может применяться практически с любыми протоколами.

Во втором случае, ведущий абонент передаёт сигнал через равные промежутки времени, известные любому ведомому абоненту. Время распространения в этом случае определяется по (2):

$$t_p = t_{oa} \bmod t_{pr} \quad (2)$$

Где t_p – искомое время распространения сигнала, t_{oa} – время прихода сигнала ведомому абоненту, а t_{pr} – период излучения сигнала ведущим.

Из (2) видно, что, во-первых, схема явно накладывает ограничения на совместное использование канала передачи, а во-вторых, при помощи неё нельзя измерить время распространения большее, чем t_{pr} . С другой стороны она позволяет одновременно измерять дальность до ведущего неограниченному числу ведомых. Такая схема может быть использована в узкоспециализированных задачах вроде привода водолазов или АНПА.

В обеих этих схемах, получателю, измеряющему дальность не требуется наличия передающего тракта, а передающему абоненту не требуется иметь в составе оборудования приёмный тракт.

Основной недостаток схем с предварительной синхронизацией часов абонентов состоит в накоплении ошибки, связанной с неравномерностью хода часов.

Например, если отталкиваться от значения в ± 3 ppm[8], и некоей пороговой величины в 1 мс, соответствующей ошибке определения дальности в 1.5 м в случае гидроакустического сигнала, то такая ошибка накапливается в среднем за 333 сек.

При использовании термокомпенсированных источников тактирования, обеспечивающих стабильность хода в диапазоне 0.15 ppm[8] временная ошибка в 1 мс накапливается за 1.8 ч.

Применение миниатюрных атомных часов[10] позволяет обеспечивать удовлетворительную точность измерения порядка недели[11], однако, требует целого комплекса дополнительных мероприятий.

Модемы uWave и могут быть использованы для работы по схеме с предварительной синхронизацией и периодическим излучением, для чего они имеют функцию периодической передачи заданного сообщения и специальный логический сигнал, синхронизированный с моментами начала передачи и приема начала входящего сообщения, выведенный на отдельную жилу кабеля. Но в данной работе описывается эксперимент, который проводился по прямому методу «запрос-ответ», как наиболее широко применяемому и простому, а также позволяющему абстрагироваться от ошибок, связанных с несовершенством источников тактирования и наоборот, большее внимание уделить ошибкам, связанным с условиями распространения звука в среде.

Рассмотрим более детально работу метода, проиллюстрировав её временной диаграммой на рис.1

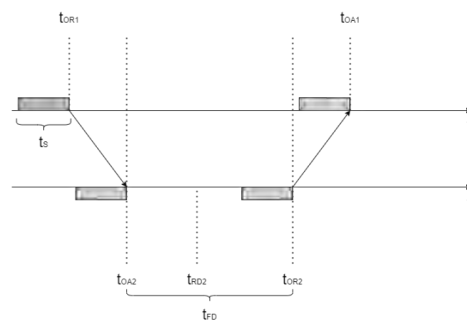


Рис. 1 – Временная диаграмма метода «запрос-ответ»

На диаграмме показаны две оси t_1 и t_2 , представляющие соответственно ход часов запрашивающего и запрашиваемого абонентов, прямоугольниками обозначен сигнал, имеющий длительность t_s . В момент времени t_{OR1} запрашивающий абонент начинает излучение запросного сигнала, начало которого достигает запрашиваемого в момент t_{OA2} . В виду того, что во-первых, приемнику требуется некоторое время для принятия решения о наличии полезного сигнала (момент t_{RD}), а во-вторых, имея в виду полудуплексность канала связи, абоненту требуется дождаться окончания приема для перехода в режим передачи, он определяет момент прихода t_{OA2} , и отсчитывает от него фиксированное время задержки t_{FD} , известное запрашивающему абоненту, после чего начинает излучение ответного сигнала в момент времени t_{OR2} . Ситуация повторяется на стороне запрашивающего, где он определяет момент прихода сигнала t_{OA1} , который используется в формуле (1) для определения времени распространения сигнала.

Отметим, что наибольшую погрешность вносят измерения времен прихода t_{OA} , на которые непосредственно оказывают влияния условия прохождения сигнала через среду, а так же несовершенство алгоритма приемника. В прямом методе измерение времени прихода сигнала происходит дважды - как на стороне запрашиваемого, так и на стороне запрашивающего абонентов.

2. Описание эксперимента

Эксперимент проводился в январе 2024 года на оз. Сарпа в г. Волгоград. Дно водоёма илистое, а глубина по всей площади практически не меняется и находится в пределах 2-2.5 м. Водоём является солоноватым и имеет солёность 1.35 PSU.

Наличие ледового покрова позволяет обеспечить полную неподвижность устройств в течение всего эксперимента и точно измерить их взаимное расположение.

Эксперимент состоял из нескольких серий измерений времени распространения сигнала между двумя гидроакустическими модемами, где каждая серия проводилась при разном взаимном расположении модемов. При этом один из модемов (запрашивающий) оставался неподвижным на протяжении всего эксперимента, а положение второго (запрашиваемого) менялось для каждой серии измерений.

Стоит отметить, что измерение времени распространения в модемах uWave происходит в режиме коротких кодовых сообщений, при этом, запрос содержит идентификатор команды (и адрес запрашиваемого, если работа происходит в пакетном режиме с логической адресацией), а ответ содержит запрашиваемые данные, например, показания встроенного датчика глубины, температуры, напряжения питания запрашиваемого модема или просто подтверждение. Таким образом, в данном случае можно говорить именно об измерении времени распространения модемом, т.е. одновременно с передачей данных.

На рис. 2 показаны положения ведущего модема (точка В) и положения ведомого при выполнении серий измерений (точки 0 .. 9).

Расположение всех точек на линии В-9 контролировалось визуально при помощи лазерного дальномера, как и расстояние от точки В до точек 2 (50 м), 5 (75 м) и 8 (100 м). Положение точек 1 и 3 от точки 2, точек 4 и 6 от точки 5, точек 7 и 9 от точки 8 контролировалось при помощи линейки и составляет 2 метра.

Таким образом, расстояния между ближайшими точками в каждой из трех групп определяются с точностью порядка диаметра кабеля модема (6 мм), а расстояния до ведущего модема с точностью порядка 1 метра, согласно характеристикам дальномера.

Стоит отметить, что малые, относительно максимальной дальности связи, которая составляет 1000 м для базовой версии модемов расстояния выбраны, во-первых, из удобства обеспечения эксперимента: возможности расположения всех положений на одной линии ввиду ограничений со стороны доступных средств измерения, а во-вторых, обуславливаются параметрами водоёма.

Расстояние от верхней кромки льда до середины модемов выдерживалось 0.9 м во всех экспериментах, что соответствует примерно середине расстояния от поверхности до дна. Толщина льда во время проведения эксперимента 0.25 м.

Температура воды по данным встроенного в модем сенсора составила 3°C.

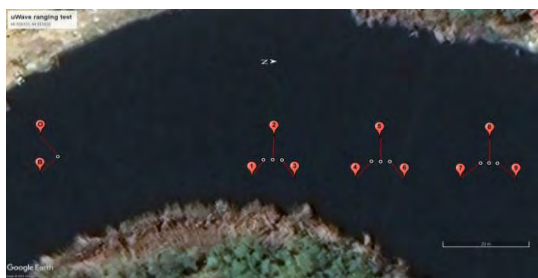


Рис. 2 – Взаимное расположение абонентов в ходе эксперимента

В каждой из точек 0 .. 9 выполнялось по 128 транзакций «запрос-ответ» в скоростном режиме 78 бит/с. В результате каждой транзакции:

измерялось время распространения сигнала;

передавались телеметрические данные от ведомого (глубина, температура, напряжение питания по очереди);

производился подсчёт неуспешных попыток измерения.

Питание ведущего модема осуществлялось от USB порта ПК, а ведомого от батарейной сборки на основе LiFePO4 элементов, обеспечивающей напряжение питания 14 Вольт.

Для взаимодействия с ведущим модемом применялось стандартное ПО uWaveCommander[12], имеющее функцию выполнения фиксированного числа транзакций (запросов).

На рис. 3 приведена фотография места расположения ведущего модема.



Рис. 3 - Расположение ведущего модема на льду в ходе проведения эксперимента

В таблице 1 отображены соответствующие ожидаемые, т.е. измеренные по поверхности расстояния и количество успешных транзакций для каждой из серий.

Отметим, что процент успешных транзакций хорошо согласуется с экспериментом, проведённым на этом же водоёме с таким же набором оборудования в летний период[13].

Таблица №1

Ожидаемое расстояние и размер выборки

№	Положение ведомого	Расстояние между абонентами, м	Число успешных транзакций из 128	Процент успешных транзакций, %
0	В (0)	0	128	100,0
1	1	48	127	99,2
2	2	50	126	98,4
3	3	52	126	98,4
4	4	73	121	94,5
5	5	75	123	96,1
6	6	77	125	97,7
7	7	98	128	100,0
8	8	100	127	99,2
9	9	102	127	99,2

3. Анализ результатов эксперимента

2.1. Влияние условий распространения сигнала

Полученные значения времён распространения сигнала для каждой из серий измерений представлены повторяющимися значениями из ограниченного набора, с дискретностью соответствующей точности, с которой устройство

передаёт измеренное время распространения: 10 мкс.

На рисунках 4 – 6 представлены распределения нормализованных времён распространения в экспериментах, разделённые по дальностям на группы по три. Группа 1: 48, 50, 52 м, группа 2: 73, 75, 77 м, группа 3: 98, 100, 102 м

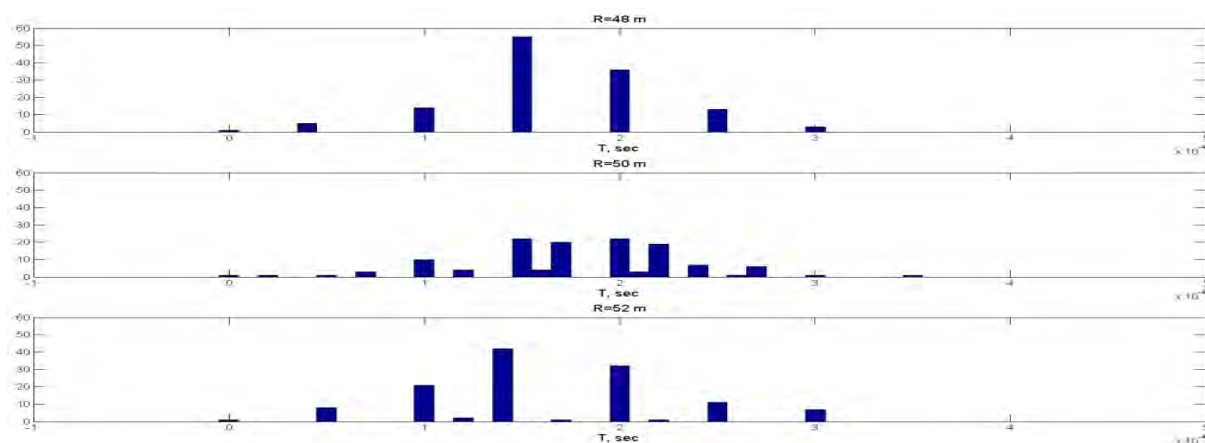


Рис. 4 – Распределение нормализованных времён распространения на дальностях 48, 50 и 52 м.

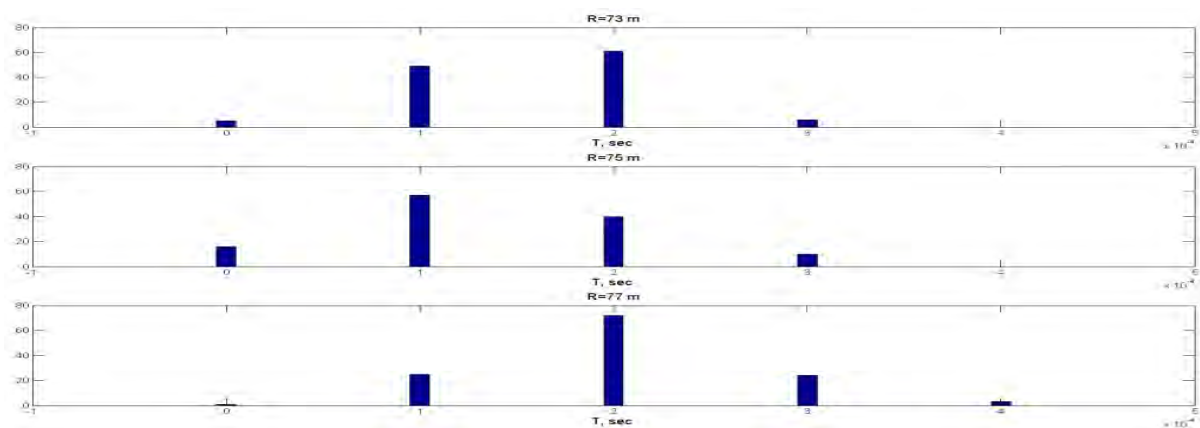


Рис. 5 – Распределение нормализованных времён распространения на дальностях 73, 75 и 77 м.

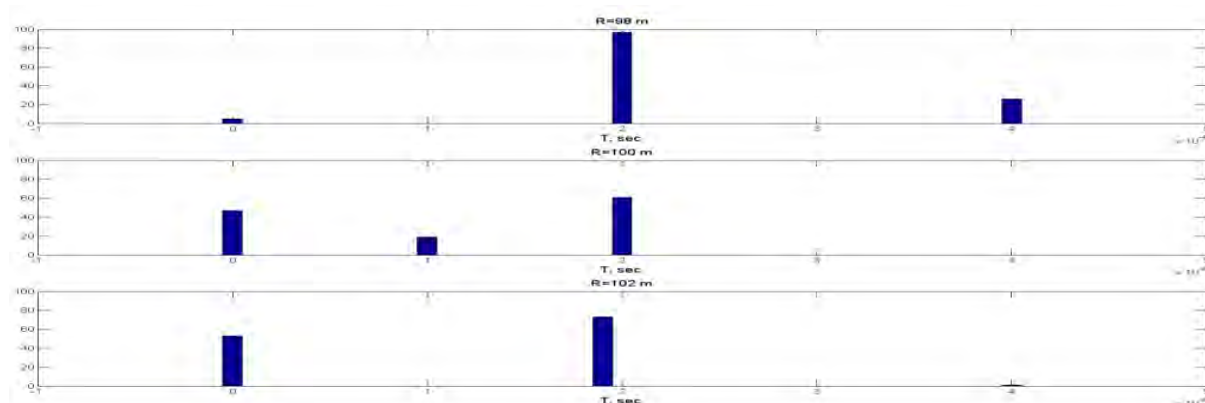


Рис. 6 – Распределение нормализованных времён распространения на дальностях 98, 100 и 102 м.

Можно видеть, что, с увеличением дальности разброс практически не изменяется и не превышает 0.5 миллисекунд, но уменьшается количество различных промежуточных вариантов. Необходимо отметить, что шаг делений по оси X для всех гистограмм практически соответствует длительности

символа (чипа) применяемого сигнала. Таким образом, в группах экспериментов 2 и 3 приёмник фиксирует момент прихода сигнала с дискретностью, соответствующей одному символу сигнала, в то время как в группе 1 дискретность соответствует

точности измерения времени (и передачи её модемом управляющей системе).

Количественно охарактеризовать изменение статистических параметров точности измерения времени распространения с дальностью можно при помощи зависимости среднеквадратичного отклонения по выборке от дальности. График полученной зависимости приведён на рис. 7.

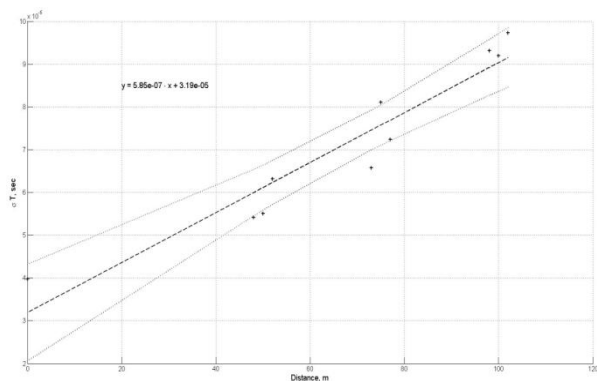


Рис. 7 – Зависимость среднеквадратичного отклонения времени распространения σ_T по выборкам от дальности.

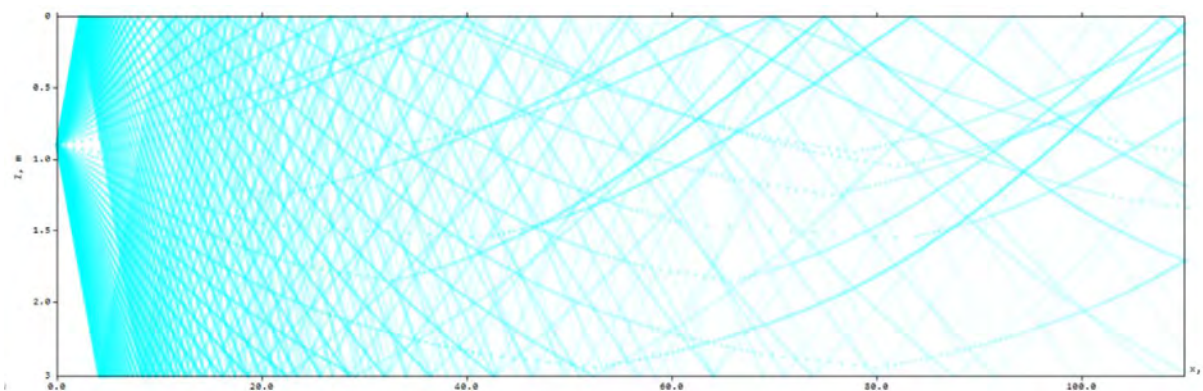


Рис. 8 - Трассировка лучей. Шаг по глубине 0.1 м, 64 луча, раствор диаграммы направленности 45°.

Для качественной оценки увеличения длины траектории, проходимого лучами выбираются 10 лучей с минимальными углами скольжения θ (угол относительно горизонтали). На рис. 9 показана зависимость разности между длиной траектории и координатой x для выбранных лучей.

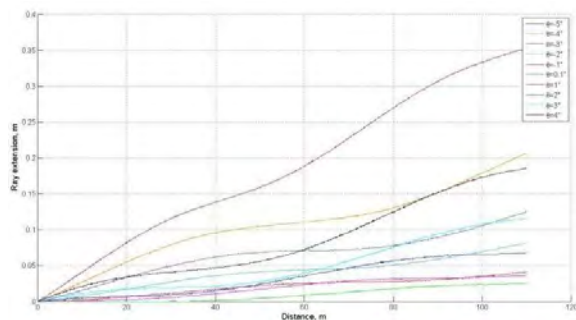


Рис. 9 - Зависимость удлинения траекторий лучей, вышедших из передатчика под разными углами, от дальности

Такую форму зависимости СКО от дальности затруднительно связывать с внутренними факторами, т.е. присущими устройству. И численные параметры зависимости и её линейный характер, а также изменение распределений времён распространения может быть объяснено при рассмотрении условий прохождения сигнала в среде.

Основная гипотеза состоит в том, что наблюдаемые эффекты связаны с ростом пути, проходимого лучами. Лучом называют направление распространения волны, или перпендикуляр к фронту волны в данной точке.

Для того, чтобы качественно оценить явление, т.е. в данном случае оценить, как изменяется путь, проходимый лучами, выходящими из источника под разными углами, достаточно выполнить трассировку лучей исходя только из закона Снеллиуса. Температурный профиль практически не играет никакой роли, т.к. температура водоёма изменялась от 3.0 до 3.6 °C от поверхности ко дну.

На рис. 8 для наглядности приведён результат трассировки лучей при помощи утилиты uRayTracerDemo[14], исходя из условий эксперимента.

Лучевая картина в естественном водоёме носит во многом стохастический характер и сильно зависит от профиля дна и ледовой кромки, береговой линии, объёмных неоднородностей, градиента скорости звука, положения передатчика, а также его параметров и параметров сигнала. Поэтому в данном случае эффект можно оценить лишь качественно.

3.1.1. Предварительные выводы

Из графиков на рис. 9 видно, что в целом, удлинение траекторий лучей носит характер, близкий к линейному. Логично связать увеличение СКО времен распространения с удлинением траекторий лучей и разностей их длин;

На основании выполненной трассировки, можно сделать грубую оценку абсолютного увеличения измеряемой дальности вследствие нелинейности траектории хода лучей. Как минимум для мелководного водоёма, такая оценка по нижней границе имеет порядок 0.1% от дальности;

Изменение картины распределения времён распространения, по-видимому, также связано с изменением лучевой картины в разных экспериментах: по мере удлинения лучей, разности

их хода начинают превышать длительность одного символа сигнала, и приёмник начинает их различать как отдельные. Флуктуации измеряемых приёмником уровней лучей приводят к тому, что в разные моменты времени за максимальный могут быть приняты разные лучи, имеющие разные траектории и времена распространения.

3.2. Оценка скорости звука

Скорость звука в общем случае является функцией плотности воды, которая в свою очередь, зависит от температуры, солёности и давления.

В зависимости от условий, её значение может меняться на десятки метров в секунду, что очевидным образом отразится на рассчитываемой по времени распространения сигнала наклонной дальности.

В данной работе для расчёта скорости звука применяется эмпирическая зависимость из [15], показывающая хорошую сходимость с непосредственными измерениями в широком диапазоне условий.

В ходе эксперимента температура и давление определялась по датчику, встроенному в модемы uWave, солёность измерялась кондуктометром и составила 1.35 PSU.

Так, для измеренной температуры воды $t=3^{\circ}\text{C}$, глубине 0.9 м и указанной солёности соответствует скорость звука $v_{\text{mes}}=1419$ м/с.

На графике (рис. 10) показаны разбросы значений по нормализованным выборкам (с вычетом среднего значения). Соответствующие данные сведены в таблицу 2.

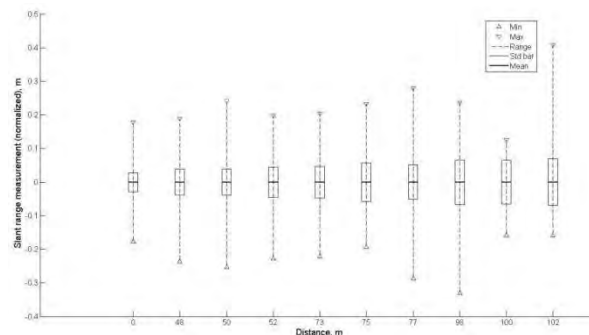


Рис. 10 - нормализованные значения измеренной дальности по выборкам для скорости звука $V=v_{\text{mes}}=1419$ м/с. Показаны границы диапазона, среднее значение и СКО.

Таблица №2

Статистические параметры измерения дальности по выборкам, $V=v_{\text{mes}}=1419$ м/с

№	Дальность по поверхности, м	Отклонение в меньшую сторону, м	Среднее значение, м	Отклонение в большую сторону, м	СКО, м	Разброс значений, м	Абс. Отклонение, м
1	0	0,177	-0,320	0,178	0,057	0,355	0,32
2	48	0,237	48,128	0,189	0,077	0,426	-0,128
3	50	0,254	50,061	0,243	0,078	0,497	-0,061
4	52	0,229	52,022	0,198	0,090	0,426	-0,022
5	73	0,222	73,016	0,204	0,093	0,426	-0,016
6	75	0,193	74,974	0,233	0,115	0,426	0,026
7	77	0,287	77,055	0,280	0,103	0,568	-0,055
8	98	0,330	97,958	0,237	0,132	0,568	0,042
9	100	0,158	100,055	0,127	0,130	0,284	-0,055
10	102	0,159	102,044	0,408	0,138	0,568	-0,044

При проведении экспериментов расстояния между устройствами по поверхности льда измерялись с разной точностью для разных взаимных расположений, и расстояния между устройствами внутри групп 48-50-52, 73-75-77, 98-100-102 измерялись при помощи линейки с точностью до диаметра кабеля модема (6 мм), а расстояния от ведущего устройства до каждой из групп при помощи лазерного дальномера с точностью 0.5 м, таким образом можно проверить правильность вычисленной скорости звука.

Для этого найдём значение аргумента, при котором функция (3) достигает минимума:

$$f(v) = \sum (\delta t_i v - r_i)^2 \quad (3)$$

Где δt_i - разности времён распространения между устройствами в разных экспериментах, r_i - соответствующие им точно измеренные расстояния по поверхности, v - искомое значение скорости звука.

Разности времён и расстояния приведены в таблице 3.

Таблица №3

Исходные данные для решения минимизационной задачи по уточнению скорости звука

№	Разности времён распространения между абонентами (по рис. 2)	δt , с	r , м
1	2-1	0,001362	2
2	3-2	0,001382	2
3	5-4	0,001380	2
4	6-5	0,001470	2
5	8-7	0,001480	2
6	9-8	0,001400	2

Функция (3) с условиями из таблицы 3 достигает минимума при значении скорости звука $V=v_{\text{est}}=1414.6$ м/с, что хорошо согласуется со значением,

полученным на основе данных от встроенного датчика модема.

Солёность воды не ощущается на вкус, и она не может составлять более 1-2 PSU[16], что хорошо согласуется с измеренным значением в 1.35 PSU.

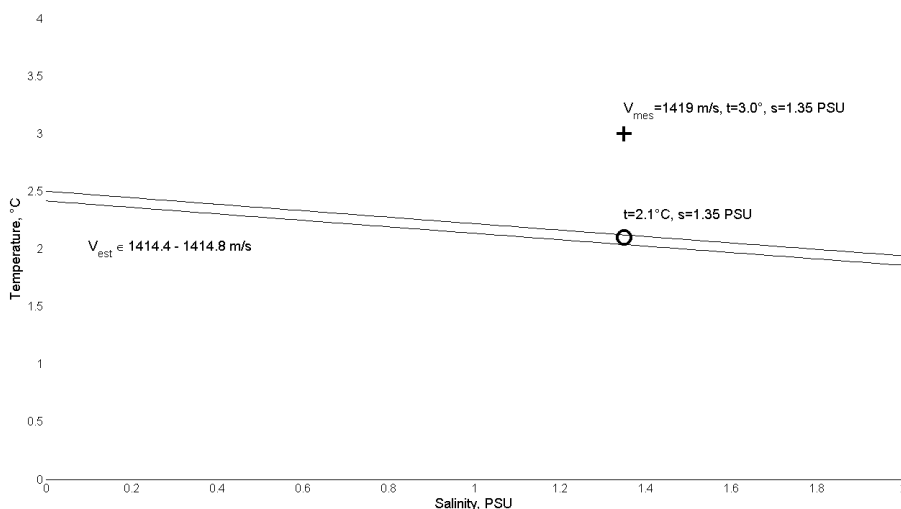


Рис. 11 - Зависимость скорости звука от температуры и солёности при постоянном давлении 1100 мБар.

Скорость звука V_{est} , полученная из минимизации функции (3), соответствует соотношению температуры и солёности, ограниченных двумя нижними наклонными линиями. Отдельно отмечены точки "+", соответствующая скорости звука V_{mes} при температуре 3°C и солёности 1.35 PSU и точка "o", соответствующая скорости звука V_{est} при солёности 1.35 PSU, при этом, температура, соответствующая данной скорости звука составляет 2.1°C.

Различие в температуре воды измеряемое непосредственно при помощи встроенного в модем датчика и оцениваемое исходя из ограничений по известной скорости звука, можно объяснить нагревом модема в процессе работы. В данной серии экспериментов вклад этого эффекта может составлять до 1°C.

3.2.1. Предварительные выводы

Два независимых способа определения скорости звука: по данным встроенного в модем датчика температуры и давления и по временам распространения между точками, отстоящими друг от друга на известном расстоянии, дают хорошо согласующиеся между собой оценки - 1419 и 1414.6 м/с;

Расстояния, рассчитанные по двум значениям скорости звука, полученным разными способами отличаются не более чем на 0.2% от дальности;

Заключение

В работе проведён анализ метода «запрос-ответ» для определения времени распространения сигнала и проведена его экспериментальная проверка на гидроакустических модемах uWave. Выделены источники погрешностей. В частности, выявлена линейная зависимость роста среднеквадратичного отклонения измерений времени распространения с дальностью. В качестве источника указан эффект

На рис. 11 представлен график зависимости скорости звука согласно [15] от температуры (1 .. 4°C) и солёности (0 .. 2 PSU) при постоянном давлении.

удлинения траекторий лучей в виду нелинейности распространения звука в среде.

Применяемая эмпирическая зависимость [15] для расчёта скорости звука в воде, как функции температуры, солёности и давления, даёт хорошую сходимость с оценкой скорости звука, полученной по измерению времени распространения между точками, расстояние между которыми измерено точно. Выявленное несоответствие в оценках скорости звука, полученных разными способами, объясняется завышением показаний температуры от встроенного датчика модема на величину 0.9°C, вызванного, по всей видимости, нагревом модема в процессе работы.

Проведенная экспериментальная проверка точности определения времени распространения сигнала и наклонной дальности между модемами uWave показала, что среднеквадратичное отклонение имеет порядок 0.1% от дальности.

Дальнейшие исследования вопроса должны включать выполнение большего числа измерений на большем диапазоне расстояний, вплоть до максимальной паспортной дальности модемов - 1000 м, с параллельным построением импульсной характеристики канала. Планируется рассмотреть более детально влияние рефракции, для чего необходимы эксперименты в водоемах с глубинами более 20-30 метров.

Дополнительная информация

Исходный набор данных, полученный в ходе экспериментов доступен онлайн [17].

Набор данных включает файлы журнала приложения uWaveCommander [12], в которых содержится весь информационный обмен с ведущим модемом в ходе экспериментов, а также сведенные в таблицу (в формате CSV) времена распространения сигнала.

Литература

1. Alamleh H., AlQahtani A. A. S., Al Smadi B. Comparative Analysis of Underwater Positioning and Navigation Systems // 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, USA, 2021, pp. 763-767.
2. Khan A., Ihsan Ali, Ghani Abd, Khan N., Alsaqer, M., Rahman A., Mahmood H. Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks: Taxonomy, Research Challenges, Routing Strategies and Future Directions // Sensors 2018, 18. 10.3390/s18051619.
3. Li Z., Sun D., Dosso S.E. Analytical study of acoustic ranging accuracy. Ocean Acoustics (COA), 2016 IEEE/OES China. IEEE, 2016, p. 1–4.
4. Bingham B.S. Estimating system-level uncertainty for underwater navigation incorporating acoustic ranging and dead reckoning. J. of Ocean Technology. 2011(6)
5. Alcocer A., Oliveira P., Pascoal A., Underwater acoustic positioning systems based on buoys with GPS // Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics 8, 2006
6. Lv, Chengcai & Ou, Wen & Liu, Jun & Shen, Binjian & Xu, Dazhen & Zhang, Shengzong & Zhu, Yuqi & Yuanjie, Song. (2024). Methods to Estimate Positioning and Time Offset with Underwater Acoustic Positioning System. 10.3233/FAIA231338.
7. Wang Y., Huang S. H., Wang Z., Hu, R., Feng M., Peizhou D., Wencheng Y., Chen Y. Design and experimental results of passive iUSBL for small AUV navigation. Ocean Engineering. 248. 110812. 10.1016/j.oceaneng.2022.110812.
8. Wang Z., Wu J. A Method to Increase the Frequency Stability of a TCXO by Compensating Thermal Hysteresis. Sensors (2020). (Switzerland). 20. 1-16. 10.3390/s20236812.
9. Патент № 2659299 С1 Российская Федерация, МПК G01S 3/80. способ и система навигации подводных объектов : № 2017108190: заявл. 13.03.2017: опубл. 29.06.2018 / А. В. Дикарев, С. М. Дмитриев, В. А. Кубкин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория подводной связи и навигации" (ООО "Лаборатория подводной связи и навигации"). – EDN LNCJZI.
10. Lutwak, R., Emmons, D., Riley, W., Garvey R. M. The Chip-Scale Atomic Clock – Coherent Population Trapping vs. Conventional Interrogation // Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, VA, December 2002, pp. 539-550.
11. Kebkal K.G., Kebkal O., Glushko I., Kebkal V. K., Sebastiao L., Pascoal A., Gomes J., Ribeiro J., Silva, H., Ribeiro M. Underwater Acoustic Modems with Integrated Atomic Clocks for One-Way Travel-Time Underwater Vehicle Positioning. Conference: UACE2017 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition, At Skiathos, Greece
12. Репозиторий проекта uWaveCommander на GitHub: github.com/ucnl/uWaveCommander (accessed 25/04/2024)
13. Дикарев А. В., Дмитриев С. М., Кубкин В. А. Особенности работы нескольких кодово разделенных пар абонентов в одной акватории // Гидрокосмос. 2023. Т. 1, 2. № 3–4. С. 109–115.
14. Репозиторий проекта uRayTracerDemo на GitHub: github.com/ucnl/uRayTracerDemo (accessed 25/04/2024)
15. C-T. Chen and F.J. Millero, Speed of sound in seawater at high pressures (1977) J. Acoust. Soc. Am. 62(5).
16. ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством" утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 18.10.1982 N 3989.
17. Исходный набор данных, полученный в ходе эксперимента (zip-архив): github.com/ucnl/github.io/blob/master/documentation/uwave_prop_times_jan_2024.zip (accessed 25/04/2024)

References

1. Alamleh H., AlQahtani A. A. S., Al Smadi B. Comparative Analysis of Underwater Positioning and Navigation Systems // 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, USA, 2021, pp. 763-767.
2. Khan A., Ihsan Ali, Ghani Abd, Khan N., Alsaqer, M., Rahman A., Mahmood H. Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks: Taxonomy, Research Challenges, Routing Strategies and Future Directions // Sensors 2018, 18. 10.3390/s18051619.
3. Li Z., Sun D., Dosso S.E. Analytical study of acoustic ranging accuracy. Ocean Acoustics (COA), 2016 IEEE/OES China. IEEE, 2016, p. 1–4.
4. Bingham B.S. Estimating system-level uncertainty for underwater navigation incorporating acoustic ranging and dead reckoning. J. of Ocean Technology. 2011(6)
5. Alcocer A., Oliveira P., Pascoal A., Underwater acoustic positioning systems based on buoys with GPS // Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics 8, 2006
6. Lv, Chengcai & Ou, Wen & Liu, Jun & Shen, Binjian & Xu, Dazhen & Zhang, Shengzong & Zhu, Yuqi & Yuanjie, Song. (2024). Methods to Estimate Positioning and Time Offset with Underwater Acoustic Positioning System. 10.3233/FAIA231338.
7. Wang Y., Huang S. H., Wang Z., Hu, R., Feng M., Peizhou D., Wencheng Y., Chen Y. Design and experimental results of passive iUSBL for small AUV navigation. Ocean Engineering. 248. 110812. 10.1016/j.oceaneng.2022.110812.
8. Wang Z., Wu J. A Method to Increase the Frequency Stability of a TCXO by Compensating Thermal Hysteresis. Sensors (2020). (Switzerland). 20. 1-16. 10.3390/s20236812.
9. Patent № 2659299 C1 Russian Federation, MPK G01S 3/80. Method and system of navigation of underwater objects: № 2017108190: application 13.03.2017: published 29.06.2018 / A. V. Dikarev, S. M. Dmitriev, V. A. Kubkin; Assignee: Limited liability company "Underwater communication & navigation laboratory" . – EDN LNCJZI.

10. Lutwak, R., Emmons, D., Riley, W., Garvey R. M. The Chip-Scale Atomic Clock – Coherent Population Trapping vs. Conventional Interrogation // Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, VA, December 2002, pp. 539-550.
11. Kebkal K.G., Kebkal O., Glushko I., Kebkal V. K., Sebastiao L., Pascoal A., Gomes J., Ribeiro J., Silva, H., Ribeiro M. Underwater Acoustic Modems with Integrated Atomic Clocks for One-Way Travel-Time Underwater Vehicle Positioning. Conference: UACE2017 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition, At Skiathos, Greece
12. uWaveCommander project repository: github.com/ucnl/uWaveCommander (accessed 25/04/2024)
13. Dikarev A. V., Dmitriev S. M., Kubkin V. A. Osobennosti raboty neskol'kih kodovo razdelennykh par abonentov v odnoy akvatorii // Gidrokosmos. 2023. T. 1, 2. № 3–4. S. 109–115.
14. uRayTracerDemo project repository: github.com/ucnl/uRayTracerDemo (accessed 25/04/2024)
15. C-T. Chen and F.J. Millero, Speed of sound in seawater at high pressures (1977) J. Acoust. Soc. Am. 62(5).
16. GOST 2874-82 "Drinking water. Hygienic requirements and quality control" approved by the Resolution of the USSR State Committee on Standards dated 18.10.1982 N 3989.
17. Source dataset (zip-archive): github.com/ucnl/ucnl.github.io/blob/master/documentation/uwave_prop_times_jan_2024.zip (accessed 25/04/2024)

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

Дикарев Александр Васильевич, Руководитель разработок, Лаборатория подводной связи и навигации, 121205, Москва г, Сколково инновационного центра тер, Большой б-р, дом 42, строение 1, ЭТ 3 ПОМ 1098 РАБ 10, e-mail: a.dikarev@unavlab

Alexander V. Dikarev, R&D Director, Underwater communication & navigation laboratory, 121205, Skolkovo innovation center, Bolshoy bld, 42, building 1, office 1098/10), Moscow, Russian Federation, e-mail: a.dikarev@unavlab.com

Дмитриев Станислав Михайлович, Главный инженер, Лаборатория подводной связи и навигации, 121205, Москва г, Сколково инновационного центра тер, Большой б-р, дом 42, строение 1, ЭТ 3 ПОМ 1098 РАБ 10, e-mail: s.dmitriev@unavlab

Stanislav M. Dmitriev, CTO, Underwater communication & navigation laboratory, LLC. 121205, Skolkovo innovation center, Bolshoy bld, 42, building 1, office 1098/10), Moscow, Russian Federation, e-mail: s.dmitriev@unavlab

Кубкин Виталий Анатольевич, Ведущий разработчик, Лаборатория подводной связи и навигации, 121205, Москва г, Сколково инновационного центра тер, Большой б-р, дом 42, строение 1, ЭТ 3 ПОМ 1098 РАБ 10, e-mail: v.kubkin@unavlab

Vitaliy A. Kubkin, Senior Engineer, Underwater communication & navigation laboratory, LLC. 121205, Skolkovo innovation center, Bolshoy bld, 42, building 1, office 1098/10), Moscow, Russian Federation, e-mail: v.kubkin@unavlab.com

Василенко Андрей Владимирович, Ведущий инженер-электронщик, Лаборатория подводной связи и навигации, 121205, Москва г, Сколково инновационного центра тер, Большой б-р, дом 42, строение 1, ЭТ 3 ПОМ 1098 РАБ 10, e-mail: a.vasilenko@unavlab

Andrey V. Vasilenko, Senior PCB designer, Underwater communication & navigation laboratory, LLC. 121205, Skolkovo innovation center, Bolshoy bld, 42, building 1, office 1098/10), Moscow, Russian Federation, e-mail: a.vasilenko@unavlab.com

Абелентцев Артур Павлович, Генеральный директор, Лаборатория подводной связи и навигации, 121205, Москва г, Сколково инновационного центра тер, Большой б-р, дом 42, строение 1, ЭТ 3 ПОМ 1098 РАБ 10, e-mail: a.abelentsev@unavlab

Arthur P. Abelentsev, CEO, Underwater communication & navigation laboratory, LLC. 121205, Skolkovo innovation center, Bolshoy bld, 42, building 1, office 1098/10), Moscow, Russian Federation, e-mail: a.abelentsev@unavlab.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.05.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.05.2024.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 62-50.531.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.019>

Автоматическое построение элементов представления процедурных знаний подводным интеллектуальным роботом в условиях недоопределенности

Мелехин В.Б.¹ pashka1602@rambler.ru, Хачумов М.В.^{2,3,4} khmike@inbox.ru

¹Дагестанский государственный технический университет, ²Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, ³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, ⁴Российский университет дружбы народов

Аннотация. В статье рассматриваются и решаются проблемы, связанные с развитием одного из подходов к построению модели представления процедурных знаний интеллектуального робота в виде заданного набора фрейм-микропрограмм поведения. В общем случае фрейм-микропрограммы представляют собой навыки поведения, связанные с решением соответствующих им подзадач безотносительно к конкретной предметной области, обеспечивающие роботу возможность автоматического формирования планов целенаправленной деятельности, связанных с решением сложных задач в различных условиях проблемной среды. Иначе говоря, фрейм-микропрограммы поведения являются «кирпичиками», на основе которых интеллектуальный робот может конструировать сложные планы целенаправленной деятельности в различных условиях функционирования.

В развитие данной модели представления процедурных знаний робота предложена структура фрейм-микропрограммы поведения, в результате декомпозиции которой можно получить модули, определяющие относительно простые навыки поведения. Такой подход позволяет роботу организовать либо более гибкий процесс планирования целенаправленной деятельности в недоопределенных проблемных средах, либо обеспечить интеллектуального робота возможностью автоматического построения недостающих для достижения заданной цели типовых элементов представления процедурных знаний. Выбор конкретного из данных двух способов использования полученных в результате разбиения фрейм-микропрограмм поведения модулей зависит от сложности решаемой интеллектуальным роботом задачи и размерности семантической сети, описывающей текущую ситуацию проблемной среды.

Определены условия, обеспечивающие выбор результативных модулей представления знаний в процессе планирования целенаправленной деятельности и автоматического построения недостающих для вывода решений фрейм-микропрограмм поведения. Показано, что предложенный подход к построению модели представления процедурных знаний и инструментальных средств их обработки в процессе планирования целенаправленной деятельности позволяет повысить когнитивные возможности интеллектуальных роботов и на этой основе обеспечить решение сложных задач в недоопределенных проблемных средах.

Ключевые слова: подводный интеллектуальный робот, проблемная среда, процедурные знания, семантическая сеть, композиция, декомпозиция.

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. Автоматическое построение элементов представления процедурных знаний подводным интеллектуальным роботом в условиях недоопределенности. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 155—162. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.019

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.019>

Automatic construction of procedural knowledge representation elements by an underwater intelligent robot under conditions of uncertainty

Vladimir B. Melekhin¹ pashka1602@rambler.ru, Mikhail V. Khachumov^{2,3,4} 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, ⁴RUDN University, Russian Federation

Abstract. The article discusses and solves problems associated with the development of one of the approaches to constructing a model for representing the procedural knowledge of an intelligent robot in the form of a given set of behavioral frame-microprograms. In general, frame microprograms represent behavioral skills associated with solving the corresponding subtasks, without reference to a specific subject area, providing the robot with the ability to automatically generate plans for goal-directed activities related to solving complex problems in various environmental conditions. In other words, frame-microprograms of behavior are the "building blocks" on the basis of which an intelligent robot can construct complex plans for purposeful activity in various operating conditions.

In development of this model for representing a robot's procedural knowledge, a structure of a frame-microprogram is proposed, as a result of the decomposition of which it is possible to obtain modules that define relatively simple behavioral skills. This approach allows the robot to organize either a more flexible process of planning purposeful activities in underdetermined problem environments, or to provide the intelligent robot with the ability to automatically construct typical elements of procedural knowledge representation that are missing to achieve a given goal. The choice of a particular one of these two methods of using the modules obtained as a result of splitting the behavioral frame-microprograms depends on the complexity of the task being solved by the intelligent robot and the dimension of the semantic network describing the current situation of the problem environment.

The conditions have been determined to ensure the identification and selection of effective knowledge representation modules in the process of planning targeted activities and the automatic construction of behavioral frame-microprograms that are missing for the conclusion of decisions. It is shown that the proposed approach to constructing a model for representing procedural knowledge and tools for processing it in the process of planning purposeful activities makes it possible to increase the cognitive capabilities of intelligent robots and, on this basis, provide solutions to complex problems in underdetermined problem environments.

Keywords: underwater intelligent robot, problem environment, procedural knowledge, semantic network, composition, decomposition.

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. Automatic construction of procedural knowledge representation elements by an underwater intelligent robot under conditions of uncertainty. Marine intelligent technologies. 2024. № 2 part 1, P. 165—172. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.019

Введение

Одной из актуальных проблем искусственного интеллекта является создание подводных интеллектуальных роботов (ИР), которые способны решать сложные практические задачи в недоопределенных проблемных средах (ПС). Такая необходимость обусловлена тем, что априори построить подробную формальную модель различных условий функционирования, в которых предстоит целенаправленно действовать ИР, на практике не представляется возможным [1]. Следовательно, в подводной проблемной среде ИР фактически вынужден целенаправленно действовать в априори недоопределенных условиях функционирования. Таким образом, возникает необходимость в построении такой модели представления процедурных знаний ИР безотносительно к конкретной предметной области, которая позволяет роботу адаптироваться к условиям недоопределенности и на этой основе решать сложные практические задачи в различных условиях подводной проблемной среды.

Кроме того, в случае большой размерности формального описания текущей ситуации ПС и охватом всей этой ситуации предстоящей целенаправленной деятельностью ИР в априори недоопределенных условиях функционирования, может возникнуть потребность в декомпозиции решаемой роботом задачи на подзадачи [2], а также в разбиении на типовые модули заданных роботу элементов процедурного представления знаний. Такая необходимость в разбиении заданных процедурных элементов представления знаний может быть связана с целью автоматического построения на основе полученных таким образом модулей новых элементов представления знаний, которые позволяют ИР эффективно решить стоящую перед ним задачу или подзадачу в текущих условиях функционирования.

Следует отметить, что в последнее время для планирования целенаправленной деятельности интеллектуальных роботов широкое распространение получили модели представления знаний и вывода решений, основанные на

применении логики предикатов первого порядка [3-6]. Однако такой подход к построению решателей задач интеллектуальных роботов, с одной стороны, не позволяет им адаптироваться к текущим априори недоопределенным условиям функционирования. С другой же стороны, использование такой модели представления знаний приводит к экспоненциальной сложности вывода решений [7], а это, в свою очередь, не позволяет ИР решать сложные практические задачи в реальных проблемных средах.

К одному из подходов решения отмеченной выше проблемы следует отнести применение в качестве априори заданных элементов модели представления процедурных знаний ИР фрейм-микропрограмм поведения (ФМП) [8], в которых условия, характеризующие результирующую целенаправленную обработку роботом входящих в их структуру действий, определяются активными нечеткими семантическими сетями [9]. При этом возникает необходимость в построении такой структуры ФМП, которая позволяет ИР на основе операций композиции, после декомпозиции заданных фрейм-микропрограмм поведения на типовые модули, автоматически синтезировать новые типовые элементы процедурного представления знаний, обеспечивающие решение стоящей перед роботом задачи в текущих априори недоопределенных условиях функционирования.

1. Постановка задачи

Рассмотрим подводного интеллектуального робота, который состоит из следующих подсистем [10]:

- информационно измерительной подсистемы, предназначенной для распознавания находящихся в ПС объектов, а также определения количественных оценок отношений, которые выполняются в проблемной среде между данными объектами и роботом;
- интеллектуального решателя задач, включающего базу знаний, представляющую собой набор ФМП, обеспечивающих ИР (согласно назначению) возможность решения определенного класса задач в различных условиях ПС;

– моторной подсистемы и манипулятора, которые соответственно обеспечивают перемещение робота в ПС и целенаправленное манипулирование находящимися в проблемной среде объектами. Таким образом, ИР можно охарактеризовать как интеллектуальную систему, способную обрабатывать множество действий $B = \{b_{j_1}\}$, $j_1 = \overline{1, m_1}$ и распознавать множество заданных объектов $O = \{o_{j_2}(X_{j_2})\}$, $j_2 = \overline{1, m_2}$, где X_{j_2} – множество признаков, однозначно определяющих объект $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, по которым робот способен их распознать в процессе целенаправленной деятельности [11].

Пусть модель представления процедурных знаний ИР состоит из типовых элементов в виде ФМП, имеющих следующий формат описания [8]:

$$\langle\langle S_{\text{вх}} \rangle\rangle \langle\langle \text{Тело} \rangle\rangle \langle\langle S_{\text{вых}} \rangle\rangle,$$

где $S_{\text{вх}}$ – входная активная нечеткая семантическая сеть [9], определяющая условия, которые должны выполняться в ПС для результативной отработки ИР последовательности действий, образующей структуру “тела” ФМП; $S_{\text{вых}}$ – выходная активная нечеткая семантическая сеть характеризующая результат отработки ИР в ПС действий, образующих тело ФМП.

Активная нечеткая семантическая сеть представляет собой помеченный граф $G_a = (V_a, E_a)$, где $V_a = \{v_{i_1}\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$ – множество активных вершин, каждая из которых определяется множеством характеристик X_{i_1} , которыми должны обладать объекты ПС для ее пометки этими объектами в процессе планирования целенаправленной деятельности ИР в текущих условиях функционирования; $E_a = \{e_{i_2}\}$, $i_2 = \overline{1, n_2}$ – множество ребер сети, каждое из которых помечается следующими двойками $\langle a_{i_2}^1(i_3), a_{i_2}^2(i_3) \rangle$, $T_{i_2}^{i_3} >$, $i_3 = \overline{1, 5}$, характеризующими нечеткие значения отношений $R = \{r_{j_3}\}$, $j_3 = \overline{1, m_3}$, которым должны соответствовать количественные оценки $r_{j_3}^*$ этих отношений между определенными объектами в текущих условиях ПС для успешной отработки ИР действий, образующих тело ФМП. Здесь $a_{i_2}^1(i_3), a_{i_2}^2(i_3)$ – соответственно нижняя и верхняя границы подинтервала количественных значений $r_{j_3}^*$ отношения $r_{j_3} \in R$, определяемого термом $T_{i_2}^{i_3}$ лингвистической переменной [12], название которой совпадает с названием данного отношения, например, “расстояния между объектами”; $T_{i_2}^{i_3}$ – терм лингвистической переменной, определяющей допустимые качественные и количественные оценки соответствующего отношения; R – множество различных семантических отношений [13], которые могут выполняться между объектами ПС, а также данными объектами и интеллектуальным роботом. Следует отметить, что в общем случае шкалу количественных оценок лингвистических переменных, используемых для обобщенного описания отношений, сложившихся между объектами ПС, принято разбивать на пять подинтервалов, которые определяются в нечеткой форме представления термами, закрепленными за этими подинтервалами [12].

Проблемную среду можно охарактеризовать находящимися в ней объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ и

количественными значениями $r_{j_3}^*$ отношений $r_{j_3} \in R$, которые выполняются между данными объектами в текущих условиях функционирования ИР. Текущие оценки $r_{j_3}^*$ отношений $r_{j_3} \in R$, сложившихся в ПС между наблюдаемыми ИР объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, определяются информационно-измерительной подсистемой робота в процессе построения формальной модели текущей ситуации проблемной среды. Таким образом, модель текущей ситуации ПС строится ИР в виде традиционной семантической сети [13] (назовем ее пассивной семантической сетью) $G_T = (v_0, V_T, E_T)$, где v_0 – ключевая вершина семантической сети, помеченная ИР, остальная часть которой строится роботом относительно этой вершины; $V_T = \{v_{j_4}\}$, $j_4 = \overline{1, m_4}$ – множество вершин, которые помечаются объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, воспринимаемыми ИР в ПС; $E_T = \{e_{j_5}\}$, $j_5 = \overline{1, m_5}$ – множество ребер семантической сети, определяющихся количественными оценками $r_{j_1}^*$ отношений, которые сложились между объектами ПС, а также ИР и данными объектами.

Цель предстоящей деятельности задается ИР в декларативной форме представления в виде активной нечеткой семантической сети $G_a^* = (V_a^*, E_a^*)$. На первом этапе планирования целенаправленной деятельности в интеллектуальном решателе задач робота все активные вершины $v_{i_1}^* \in V_a^*$ в сети G_a^* помечаются находящимися в ПС объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, для которых выполняются условия $X_{i_1}^* \subseteq X_{j_2}$, где $X_{i_1}^*$ – множество признаков (характеристик), которыми помечена $v_{i_1}^*$ вершина в сети G_a^* . При этом, если хотя бы одна из вершин $v_{i_1}^* \in V_a^*$ в сети G_a^* остается непомеченной объектом ПС, то ИР принимает решение о недостижимости заданной цели в текущих условиях функционирования из-за отсутствия в проблемной среде необходимого для этого объекта. В этом случае заданная цель уточняется, и выполняются работы, связанные с обеспечением в ПС условий необходимых для ее достижения. Например, при отсутствии необходимого количества поддонов в процессе поднятия с большой глубины затонувшего корабля ИР уточняет необходимое их число с руководителем проводимого мероприятия.

После пометки всех вершин в сети G_a^* объектами ПС в результате получается полуактивная нечеткая семантическая сеть G_a^{**} , определяющая цель поведения ИР, привязанную к текущим условиям функционирования. Затем ИР, используя операции нечеткого равенства между собой различного вида семантических сетей, а также нечеткого вложения активных и полуактивных семантических сетей в пассивную семантическую сеть [8], формирует и обрабатывает план своей целенаправленной деятельности в виде цепочки взаимосвязанных между собой ФМП. Интеллектуальный робот принимает решение о том, что заданная цель поведения является достигнутой, если полуактивная семантическая сеть G_a^{**} является нечетко вложенной в пассивную семантическую сеть G_T^* , т.е. выполняется условие $G_a^{**} \cong G_T^*$, где пассивная семантическая сеть G_T^* отражает текущую ситуацию ПС, которая получена в результате целенаправленной деятельности ИР в исходной ситуации проблемной среды, определяемой семантической сетью G_T . Иначе говоря, заданная

цель поведения считается достигнутой, когда ИР в результате целенаправленной деятельности, манипулируя находящимися в ПС объектами, устраняет все различия по значениям одноименных отношений, наблюдаемые между исходной и заданной целевой ситуациями проблемной среды. Однако в недоопределенных условиях ПС может возникнуть такая текущая ситуация проблемной среды, для семантической сети G_T , которой в процедурной модели представления знаний отсутствует ФМП, необходимая для построения плана целенаправленной деятельности ИР. В этой связи возникает необходимость в построении таких типовых элементов представления процедурных знаний ИР, которые позволяют на основе операции декомпозиции получить такие типовые составляющие, композиция которых обеспечивает роботу возможность автоматического построения требуемого для достижения заданной цели G_a^* элемента представления знаний. В статье предлагается один из подходов решения данной проблемы, связанной с организацией более гибкого процесса планирования сложной целенаправленной деятельности ИР в различных недоопределенных проблемных средах.

2. Структура типовых элементов представления процедурных знаний ИР и инструментальные средства построения ФМП первого типа

Исходя из вышеизложенного, структуру типовых элементов представления процедурных знаний ИР в виде ФМП следует строить из модулей, каждый из которых может быть использован в следующем качестве:

- в виде типового элемента представления знаний в процессе планирования целенаправленной деятельности в недоопределенных условиях функционирования;
- элемента для автоматического построения недостающих для построения плана целенаправленной деятельности фрейм-микропрограмм поведения в процессе решения стоящей перед роботом сложной задачи.

В первом случае использование отдельных модулей позволяет обеспечить ИР более высокую гибкость вывода решений в сравнении со случаем

$$< S_{\text{вх}} \& < b_{j_1}^1, b_{j_1}^2, b_{j_1}^3 > \rightarrow S_{\text{вых}}^1 (S_{\text{вх}}^1) \& < b_{j_1}^4, b_{j_1}^5, b_{j_1}^6 > \rightarrow S_{\text{вых}}^2 (S_{\text{вх}}^2) \dots < b_{j_1}^k, b_{j_1}^{k+1} > \rightarrow S_{\text{вых}} >, \quad (1)$$

где, например, $S_{\text{вых}}^1 \& < b_{j_1}^4, b_{j_1}^5, b_{j_1}^6 > \rightarrow S_{\text{вых}}^2$ – модуль, определяющий следующий акт поведения ИР. Если в ПС выполняются условия, описывающиеся активной нечеткой семантической сетью $S_{\text{вых}}^1$, то обрабатываемый роботом кортеж действий $< b_{j_1}^4, b_{j_1}^5, b_{j_1}^6 >$ приводит в среде к изменениям, характеризующимся активной семантической сетью $S_{\text{вых}}^2$.

Следует отметить, что ФМП первого типа разбиваются на k автономных модулей, для которых выходная семантическая сеть каждого предыдущего модуля исполняет роль входной семантической сети следующего за ним другого модуля. Например, выходная семантическая сеть первого модуля $S_{\text{вых}}^1$ исполняет роль входной семантической сети второго модуля. При этом условие целенаправленного разбиения ФМП первого типа в процессе решения ИР различных задач и подзадач в недоопределенных

применения для этого отдельных ФМП. Это обусловлено тем, что при отсутствии в модели представления знаний ФМП в процессе прямого вывода [3], входная семантическая сеть, определяющая $<\text{вход}> S_{\text{вх}}$ этой фрейм-микропрограммы поведения, является нечетко вложенной в семантическую сеть G_T , характеризующую текущую ситуацию ПС. В процессе же обратного вывода в модели представления знаний робота может отсутствовать ФМП, у которой выходная семантическая сеть $S_{\text{вых}}$ является нечетко вложенной в целевую ситуацию ПС G_a^* . При декомпозиции же ФМП на составляющие могут быть получены такие модули, для которых рассмотренные выше условия выполняются. Это позволяет роботу по тому же принципу, как и при использовании ФМП [8], строить на основе полученных модулей план целенаправленной деятельности, связанный с решением стоящей перед ним подзадачи. Однако в процессе решения сложных подзадач на основе типовых модулей ФМП строится дерево вывода, имеющее большую размерность в сравнении с деревом вывода решений, формируемым при применении для этой цели фрейм-микропрограмм поведения. Данное обстоятельство связано с тем, что каждая ФМП представляет собой решение одной из типовых подзадач целенаправленной деятельности ИР, включающее несколько модулей. Таким образом, в процессе решения сложных задач и подзадач ИР целесообразно на каждом этапе планирования целенаправленной деятельности вначале автоматически сформировать требуемую для их реализации ФМП на основе типовых модулей, полученных путем декомпозиции определенных заданных в модели представления знаний фрейм-микропрограмм поведения. Рассмотрим случай, когда заданная в модели представления знаний ФМП представляет собой решение типовой подзадачи поведения в виде кортежа обрабатываемых ИР действий. В этом случае структуру ФМП для ее декомпозиции на автономные модули удобно представить в следующем формате (ФМП первого типа):

условиях ПС характеризуется следующими двумя случаями:

- 1) в процессе прямого поиска решения различных подзадач, если активная нечеткая семантическая сеть характеризующая, например, $<\text{вход}> S_{\text{вх}}^k$ модуля k является нечетко вложенной в пассивную семантическую сеть G_T , соответствующую текущей ситуации ПС. В процессе же обратного поиска декомпозицию произвольной ФМП первого типа целесообразно выполнить в том случае, когда активная нечеткая семантическая сеть, определяющая $<\text{выход}>$ одного из модулей заданной фрейм-микропрограммы поведения первого типа, является нечетко вложенной в семантическую сеть G_a^* , определяющую заданную ИР целевую ситуацию ПС;
- 2) в процессе прямого поиска решения текущей подзадачи, если активная нечеткая семантическая сеть, определяющая $<\text{вход}>$ одного из модулей

заданной ФМП первого типа, является нечетко равной семантической сети, соответствующей <выходу> одного из ранее полученных типовых модулей. В процессе же обратного поиска для целенаправленного разбиения произвольной ФМП первого типа требуется, чтобы семантическая сеть, определяющая <выход> одного из ее модулей, была бы нечетко равной семантической сети, характеризующей <вход> одного из ранее полученных модулей.

На основе полученного таким образом множества типовых модулей представления процедурных знаний ИР построение недостающих для вывода решений текущей подзадачи ФМП первого типа осуществляется следующим образом. На первом шаге в процессе прямого поиска устанавливается базовый типовой модуль, у которого семантическая сеть, определяющая его <вход>, является вложеной изоморфной в семантическую сеть G_T , соответствующую текущей ситуации ПС. Затем на основе операции конкатенации автоматически формируется цепочка взаимосвязанных между собой модулей до тех пор, пока не будет найден такой модуль, у которого семантическая сеть, определяющая его <выход>, не будет вложеной изоморфной в семантическую сеть G_a^* ,

$$S_{\text{ВХ}} \left\{ \begin{array}{l} < S_{\text{ВХ}}(1) < b_{j_1}^1(1), b_{j_1}^2(1), b_{j_1}^3(1) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}^1(1) < b_{j_1}^4(1), b_{j_1}^5(1) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}^2(1) \dots < b_{j_1}^k(1), b_{j_1}^{k+1}(1) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}(1) >, \\ & \dots \\ < S_{\text{ВХ}}(l) < b_{j_1}^1(l), b_{j_1}^2(l), b_{j_1}^3(l) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}^1(l) < b_{j_1}^4(l), b_{j_1}^5(l) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}^2(l) \dots < b_{j_1}^k(l), b_{j_1}^{k+1}(l) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}(l) >, \\ & \dots \\ < S_{\text{ВХ}}(d) < b_{j_1}^1(d), b_{j_1}^2(d) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}^1(d) < b_{j_1}^3(d), b_{j_1}^4(d) > \rightarrow \dots < b_{j_1}^k(d), b_{j_1}^{k+1}(d) > \rightarrow S_{\text{ВЫХ}}(d) >. \end{array} \right\} S_{\text{ВЫХ}},$$

где $S_{\text{ВХ}} = \bigcup_{l=1}^d S_{\text{ВХ}}(l)$; $S_{\text{ВЫХ}} = \bigcup_{l=1}^d S_{\text{ВЫХ}}(l)$; $\bigcap_{l=1}^d S_{\text{ВХ}}(l) = \emptyset$; $\bigcap_{l=1}^d S_{\text{ВЫХ}}(l) = \emptyset$.

Таким образом, каждая l строка ФМП второго типа представляет собой решение соответствующей типовой подзадачи целенаправленной деятельности ИР, связанной с преобразованием текущей ситуации ПС, для которой активная нечеткая семантическая сеть $G_{\text{ВХ}}(l)$, соответствующая подситуации $S_{\text{ВХ}}(l)$, является нечетко вложенной в семантическую сеть G_T , определяющую текущую S_T ситуацию ПС. При этом семантические сети $S_{\text{ВХ}}$ и $S_{\text{ВЫХ}}$ ФМП второго типа представляют собой соответственно соединения между собой подсетей $S_{\text{ВХ}}(l), l = \overline{1, d}$ и $S_{\text{ВЫХ}}(l), l = \overline{1, d}$ непомеченными ребрами, которые удаляются в процессе их разбиения на l подзадач, которые фактически являются фрейм-микропрограммами поведения первого типа. Обработка же роботом действий, входящих в структуру каждой l подзадачи, позволяет выполнить такие преобразования в наблюдаемой роботом ситуации ПС, которые определяются подситуацией $S_{\text{ВЫХ}}(l)$. Следовательно, данного типа ФМП могут быть разбиты как на решения типовых подзадач целенаправленной деятельности, так и на модули, определяющие отдельные типовые акты поведения ИР.

3. Условие целенаправленного выбора ФМП второго типа для их декомпозиции в процессе планирования ИР целенаправленной деятельности

Условие, которое позволяет в первом приближении обеспечить требование целенаправленного выбора для разбиения заданных ИР фрейм-микропрограмм поведения второго типа на типовые модули с учетом сложившейся в ПС

характеризующую заданную роботу целевую ситуацию. Операция конкатенации различных типовых модулей в этом случае осуществляется слева направо путем присоединения одного модуля к другому, когда семантическая сеть, определяющая <вход> следующего модуля, является нечетко равной семантической сети соответствующей <выходу> предыдущего модуля.

Аналогичным образом автоматически синтезируется ФМП первого типа и в процессе обратного поиска. Только в этом случае за базовый принимается модуль, у которого семантическая сеть, определяющая его <выход>, является нечетко вложенной в семантическую сеть G_a^* , характеризующую целевую ситуацию ПС.

Пусть заданная в модели представления процедурных знаний ФМП должна обеспечивать возможность параллельного решения нескольких подзадач, которые предусматривают необходимость в процессе целенаправленной деятельности ИР манипулирования различными находящимися в ПС объектами. В данном случае структуру такой ФМП, для ее разбиения на различные подзадачи и модули, целесообразно представить в следующем формате (ФМП второго типа):

ситуации и решаемой интеллектуальным роботом задачи или подзадачи, можно определить следующим образом:

$$G_T \cap G_{\text{ВХ}} \neq \emptyset \text{ и } G_a^* \cap G_{\text{ВЫХ}} \neq \emptyset,$$

где $\cap$ – операция пересечения различных семантических сетей с учетом нечеткого равенства пометок структурно эквивалентных в этих сетях вершин и ребер [9]; $G_{\text{ВХ}}$ и $G_{\text{ВЫХ}}$ – активные нечеткие семантические сети, соответственно, определяющие <вход> и <выход> рассматриваемой ФМП; G_a^* – активная семантическая сеть, определяющая заданную ИР целевую ситуацию ПС.

Однако данное условие является необходимым, но недостаточным с точки зрения результативного выбора ФМП второго типа для последующего разбиения с учетом решаемой ИР задачи или подзадачи в определенных условиях ПС. Необходимое и достаточное условие выбора ФМП в этом случае можно сформулировать следующим образом. Анализируемая в решателе задач ИР фрейм-микропрограмма поведения второго типа подлежит разбиению на подзадачи с последующей декомпозицией этих подзадач на отдельные типовые модули с точки зрения решаемой роботом задачи в недоопределенных условиях функционирования, если хотя бы для одной из входящей в ее структуру подзадач выполняется условие:

$$G_{\text{ВХ}} \cong G_T \text{ и } G_{\text{ВЫХ}} \cong G_a^*,$$

где $G_{\text{ВХ}}$ и $G_{\text{ВЫХ}}$ – активные нечеткие семантические сети, соответственно, определяющие входную и

выходную ситуации рассматриваемой подзадачи ФМП второго типа.

Типовые модули, полученные в результате целенаправленного разбиения ФМП второго типа, могут быть использованы роботом следующим образом:

– в виде самостоятельных элементов модели представления процедурных знаний в процессе планирования целенаправленной деятельности;

$$\begin{aligned} < S_{\text{вх}}(l) < b_{j_1}^1(l), b_{j_1}^2(l), b_{j_1}^3(l) > \rightarrow S_{\text{вых}}^1(l) \& < b_{j_1}^4(l), b_{j_1}^5(l) > \rightarrow S_{\text{вых}}^2(l) \dots \\ & \dots < b_{j_1}^k(l), b_{j_1}^{k+1}(l) > \rightarrow S_{\text{вых}}(l) >, l = \overline{1, d}. \end{aligned}$$

Автоматический же синтез ФМП второго типа на основе ФМП первого типа, необходимой ИР для построения плана целенаправленной деятельности, связанного с решением сложной текущей задачи в

– для автоматического синтеза ФМП первого типа.

Целенаправленное же разбиение ФМП второго типа на типовые подзадачи или ФМП первого типа сводится к удалению из семантических сетей $S_{\text{вх}}$ и $S_{\text{вых}}$, как уже отмечалось ранее, непомеченных ребер. В результате ИР получает решения сложных типовых подзадач следующего вида:

$$< S_{\text{вх}}(1) \& < b_{j_1}^1(1), b_{j_1}^2(1), b_{j_1}^3(1) > \rightarrow S_{\text{вых}}^1(1) \& < b_{j_1}^4(1), b_{j_1}^5(1) > \rightarrow S_{\text{вых}}^2(1) \dots < b_{j_1}^k(1), b_{j_1}^{k+1}(1) > \rightarrow S_{\text{вых}}(1) >,$$

у которой активная нечеткая семантическая сеть, характеризующая формальное описание подситуации $S_{\text{вх}}(1)$, нечетко вложена в семантическую сеть G_T , определяющую текущую ситуацию ПС. Семантическая же сеть, соответствующая формальному описанию подситуации $S_{\text{вых}}(1)$, нечетко вложена в семантическую сеть G_a^* . Затем из сетей G_T и G_a^* вырезаются участки нечетко равные семантическим подсетям, соответственно определяющим <вход> и <выход> выбранного решения первой подзадачи.

На следующем шаге синтеза ФМП второго типа устанавливается решение следующей типовой подзадачи, у которой семантические сети, определяющие ее вход $S_{\text{вх}}(2)$ и выход $S_{\text{вых}}(2)$, соответственно являются нечетко вложенными в оставшиеся части семантических сетей G_T и G_a^* .

Данный процесс выбора результативных решений типовых подзадач реализуемой ИР сложной задачи продолжается до тех пор, пока после удаления из оставшихся частей семантических сетей G_T и G_a^* подсетей очередной выбранной типовой подзадачи не получатся пустые множества. Либо оставшиеся части семантических сетей G_T и G_a^* окажутся нечетко вложенными в активные семантические подсети, соответственно определяющие <вход> и <выход> решения типовой подзадачи, выбранной на текущем шаге синтеза ФМП второго типа. В этом случае из выявленной на последнем шаге решения типовой подзадачи удаляются все типовые модули, которые не связаны с устранением различий между частями семантических сетей G_T и G_a^* , оставшимися на последнем шаге синтеза ФМП второго типа.

Наконец, для окончательного автоматического построения ФМП второго типа все подсети, определяющие <вход> и <выход> выбранных решений различных типовых подзадач, связываются между собой непомеченными ребрами.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что предложенный подход к автоматическому синтезу типовых элементов процедурного представления знаний позволяет ИР адаптироваться к априори недоопределенным условиям ПС и на этой

недоопределенных условиях ПС, осуществляется следующим образом. На первом шаге определяется следующее решение одной из заданных роботу подзадач:

основе расширять свои функциональные возможности.

Заключение

Полученные в статье результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Применение и автоматический синтез ФМП первого и второго типа позволяет строить и пополнять безотносительно к конкретной предметной области модель процедурного представления знаний ИР с учетом его функционального назначения и меняющихся условий функционирования. Организованная таким способом модель представления процедурных знаний обеспечивает ИР возможность эффективным образом планировать целенаправленную деятельность, связанную с решением сложных практических задач и подзадач в реальных априори недоопределенных проблемных средах.

2. Предложенные структуры ФМП первого и второго типа позволяют разбивать эти микропрограммы на типовые модули, которые могут быть использованы как самостоятельные элементы модели представления процедурных знаний ИР, так и элементы, служащие для автоматического синтеза фрейм-микропрограмм поведения, необходимых для вывода решения сложных задач и подзадач в различных недоопределенных условиях проблемной среды.

3. Организация целенаправленной деятельности ИР на основе ФМП дает возможность существенным образом сократить размерность строящегося дерева вывода решений сложных задач и подзадач в различных недоопределенных условиях ПС за счет одновременного выбора на каждом шаге планирования поведения нескольких результативных действий.

4. Использование типовых модулей, полученных в результате декомпозиции ФМП, позволяет ИР в процессе планирования целенаправленной деятельности повысить гибкость вывода решений в случае возникновения необходимости в устранении отдельных различий между значениями одноименных отношений в исходной и целевой ситуации проблемной среды для достижения заданной цели.

Литература

1. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
2. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Разбиение сложных задач на подзадачи в процессе планирования целенаправленного поведения интегрального беспилотного летательного аппарата в пространстве состояний // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Часть 1. № 3(49). С. 237–244.
3. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4 ed., Pearson, 2020, 1216 p.
4. G. Dudec, M. Jenkin. Computational Principles of Mobile Robotics, 4 ed., Cambridge, Cambridge University Press, 2024, 450 p.
5. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 808 p.
6. Давыдов О.И., Платонов А.К. Роботы и искусственный интеллект. Технократический подход // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 112. 24 с.
7. Вагин В.Н., Деревянко А.В., Кутепов В.П. Алгоритмы параллельного логического вывода и исследование их эффективности на компьютерных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 1. С. 3–9.
8. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.
9. 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.
10. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Управление целенаправленной деятельностью автономных летающих роботов в нестабильном окружении. СПб.: Политехника, 2023. 248 с.
11. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системой // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Часть 1. № 3(57). С. 181–187.
12. Zaden L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part I: Information Sciences. 1975. Vol. 8. Pp. 199–249; Part II: Information Sciences. 1975. Vol. 8. Pp. 301–357; Part III: Information Sciences. 1975. Vol. 9. Pp. 43–80.
13. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. 4 изд., стереотип. М.: URSS, 2021. 288 с.

References

1. Kalyaev A.V., Chernuxin Yu.V., Noskov V.N., Kalyaev I.A. Odnorodny'e upravlyayushhie struktury` adaptivny`x robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. M., Izd. «Nauka», 1990, 147 s.
2. Melekhin V.B., Xachumov M.V. Razbienie slozhny`x zadach na podzadachi v processe planirovaniya celenapravlenno go povedeniya integral`nogo bespilotnogo letatel`nogo apparata v prostranstve sostoyaniy [Partitioning complex tasks into subtasks in the process of planning the targeted behavior of an integrated unmanned aerial vehicle in state space], *Morskie intellektual`ny`e tekhnologii*, 2020. Chast` 1, no 3(49), pp. 237–244.
3. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4 ed., Pearson, 2020, 1216 p.
4. G. Dudec, M. Jenkin. Computational Principles of Mobile Robotics, 4 ed., Cambridge, Cambridge University Press, 2024, 450 p.
5. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 808 p.
6. Davy`dov O.I., Platonov A.K. Roboty` i iskusstvenny`j intellekt. Teknokraticheskij podxod [Robots and artificial intelligence. Technocratic approach], *Preprint IPM im. M.V. Keldy`sha*, 2017, no 112, 24 s.
7. Vagin V.N., Derevyanko A.V., Kutevov V.P. Algoritmy` parallel`nogo logicheskogo vy`voda i issledovanie ix e`ffektivnosti na komp`yuterny`x sistemax [Algorithms` parallel logical inference and research of their effectiveness on computer systems], *Iskusstvenny`j intellekt i prinyatie reshenij*, 2017, no 1, pp. 3–9.
8. Melekhin V.B., Xachumov M.V. Planirovanie povedeniya avtonomny`x intellektual`ny`x mobil`ny`x sistem v usloviyax neopredelennost [Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under conditions of uncertainty], St. Petersburg, izd. «Politehnika», 2022, 276 s.
9. 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.
10. Melekhin V.B., Xachumov M. V. Upravlenie celenapravlennoj deyatel`nost`yu avtonomny`x letayushhix robotov v nestabil`nom okruzhenii [Control of purposeful activities of autonomous flying robots in an unstable environment], St. Petersburg, izd. «Politehnika», 2023, 248 s.
11. Melekhin V.B., Xachumov M.V. Princip raspoznavaniya ob`ektov problemnoj sredy` v processe planirovaniya povedeniya avtonomnoj intellektual`noj mobil`noj sistemoj [The principle of recognizing objects of a problematic environment in the process of planning behavior by an autonomous intelligent mobile system], *Morskie intellektual`ny`e tekhnologii*, 2022, Chast` 1, no 3(57), pp. 181–187.
12. Zaden L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part I: Information Sciences. 1975. Vol. 8. Pp. 199–249; Part II: Information Sciences. 1975. Vol. 8. Pp. 301–357; Part III: Information Sciences. 1975. Vol. 9. Pp. 43–80.

13. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika [Situational management: theory and practice], 4 izd., stereotip. M., izd. URSS, 2021, 288 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

Мелехин Владимир Борисович, 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 Shamiya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Хачумов Михаил Вячеславович, кандидат физико-математических наук, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 152021, с. Вёсково, 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 математического моделирования и искусственного интеллекта, 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), 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. E-mail: khmike@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/ the article was submitted 16.02.2024

Одобрена после рецензирования/ approved after reviewing 04.03.2024

Принята к публикации/ accepted for publication 11.03.2024

Научная статья

УДК 303.732.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.007>**Модель построения судовых кабельных сетей и метод их уточнения на этапе постройки**Гусак Е.В.¹ Alphaplayer@yandex.ru, Гурьев А.Т.¹ atg1i@rambler.ru¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Процесс проектирования судовых кабельных трасс связан с принятием проектных решений по размещению кабеля в условиях повышенной насыщенностью помещений судна различными объектами. При этом должен соблюдаться «баланс» между минимальностью значений целевых критериев оптимальности и соблюдением ограничений на прокладку кабеля.

В статье рассматривается модель построения судовых кабельных сетей на маршрутном графе с ограничениями по пропускным способностям ребер и допустимого сопротивления для соединений. В качестве целевых критериев оптимальности задачи рассматриваются стоимость и масса кабелей. Сама задача формулируется в терминах двухкритериальной задачи линейного программирования транспортного типа.

Для упрощения поставленной задачи ее ограничения преобразуются с помощью метода разложения Данцига-Вольфа, а для ее решения рассматривается двухкритериальный метод последовательного улучшения плана, который выбирает марки кабелей в соответствии с их оптимальностью.

На точность описанной модели влияет подход к моделированию длин кабелей, которая в реальных условиях постройки судна зачастую будет больше вычисленной проектной длины. Для компенсации связанных с этим «помех» предлагается использовать специальный коэффициент среднего отклонения, который умножается на целевые критерии и ограничения, тем самым приближает проектные длины к реальным.

Ключевые слова: интеллектуальное проектирование, кабельные сети, судостроение, системный анализ, линейное программирование, транспортная задача, метод разложения, метод последовательного улучшения плана

Для цитирования: Гусак Е.В., Гурьев А.Т. Модель построения судовых кабельных сетей и метод их уточнения на этапе постройки, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 163—172. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.007

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.007>**Ship cable routing model and refinement method at the stage of construction**Evgeny V. Gusak¹ Alphaplayer@yandex.ru, Alexander T. Guryev¹ atg1i@rambler.ru¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Russian Federation

Abstract. The process of ship cable routing is associated with decisions making process on cable placement in conditions of increased saturation of various objects in the ship's compartments. In this case, a «balance» must be maintained between the minimum values of the target objective and compliance with the restrictions on cable laying.

In this article describes a model for the ship cable routing problem on a route graph with restrictions on the capacity of the edges and the permissible resistance for connections. The cost and weight of cables are selected as target objective. The problem itself is formulated in terms of a bi-objective linear programming problem of multi-commodity minimum cost flow.

To simplify the problem, its limitations are transformed using the Danzig-Wolf decomposition method, and to solve it, a two-criteria simplex method is proposed, which selects type of cable in accordance with their applying optimality.

The accuracy of the described model is influenced by the approach to modeling cable lengths, which in real conditions of ship construction will often be greater than the calculated design length. To compensate for the “interference” associated with this, it is proposed to use a special average deviation coefficient, which is multiplied by target objectives and restrictions, bringing the design lengths closer to real ones.

Keywords: intelligent design, cable networks, shipbuilding, system analysis, linear programming, multi-commodity minimum cost flow problem, Dantzig–Wolfe decomposition, simplex method, paper format, publication, electronic document, word processor

For citation: Evgeny V. Gusak, Alexander T. Guryev, Ship Cable Routing Model and Refinement Method at the Stage of Construction, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 163—172. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.007

Введение

Обеспечение безопасности судов, повышение экономической эффективности их постройки и эксплуатации, отказоустойчивости в экстремальных условиях требует разработки новых перспективных решений в области проектирования. Процесс

проектирования судна, особенно в части размещения электрооборудования и кабельных сетей, в связи с ограниченностью свободного пространства корпуса связан с трудностями и требует учета множества факторов оптимальности.

Обычно прокладка маршрутов кабелей проектировщиком осуществляется в проектом

пространстве судна от прибора до прибора по кратчайшему маршруту и игнорирует другие критерии оптимальности, которые могут повлиять на эффективность маршрутизации кабеля.

Кроме того, эффективность принятых проектных решений в части формирования кабельной сети снижется на этапе выполнения электромонтажных работ, когда проектные характеристики кабеля могут не совпасть с реальными из-за выбранной технологии выполнения электромонтажных работ, способов затяжки кабеля и иных факторов.

Для решения данных проблем требуются новые подходы к проектированию кабельных сетей, учитывающие различные критерии оптимальности и обеспечивающие высокую точность проектных решений относительно реального судна.

Исследования в области автоматизированного проектирования кабельных сетей представлены различными подходами, как в российской, так и зарубежной литературе. Одни авторы предлагают методы решения задачи построения кабельных сетей с использованием алгоритмов обхода графа для поиска кратчайших маршрутов [1], а другие формулируют задачу построения как задачу линейного программирования и решают ее с помощью специализированных методов [2]. В последнем случае задача построения кабельных сетей сводится к транспортной задаче [3]. Многокритериальная постановка транспортной задачи, где в целевых функциях достигаются экстремумы различных критериев оптимальности, была связана с трудностями в применении существующих подходов к решению задач линейного программирования, недавние исследования позволили добиться прогресса в разработке специализированных методов [4, 5].

В данной статье мы обобщаем современные подходы к решению транспортных задач и описываем двухкритериальный метод последовательного улучшения плана совместно с методом разложения Данцига–Вольфа для решения задачи построения судовых кабельных сетей и оптимизации ее целевой функции с учетом выбора оптимальных допустимых марок.

Выбор критериев оптимальности и ограничений на построение кабельных сетей

Выбор расположения кабеля в проектом пространстве судна напрямую связана с длиной кабеля, которую в первую очередь стремится подобрать проектировщик в процессе проектирования. Зависящие от длины косвенные количественные характеристики, такие как стоимость, масса и сопротивление кабеля, обычно рассчитываются на более поздних этапах проектирования при выборе марки кабеля для построенного маршрута, и их оптимальность не может быть сразу обеспечена. Следовательно, для постановки задачи данные характеристики должны быть заложены либо как ее целевые критерии, либо как ее ограничения. Разберем каждую из этих характеристик.

При прокладке кабельных маршрутов необходимо стремиться к сокращению их стоимости. Стоимость кабеля зависит от стоимости, производства и логистики. Размещение кабеля более коротким путем сокращает общие затраты на

закупаемый кабель, монтажные работы и позволяет снизить общую стоимость постройки судна.

Также проектировщик должен минимизировать массу кабеля, так как ее увеличение может сместить центр масс и повлиять на остойчивость судна. Хотя влияние кабелей на остойчивость обычно незначительно и сохраняется в пределах 1-5%, но его стоит учитывать в случае высокой плотности оборудования и кабелей на судне, когда затруднительно проводить балансировку судна с помощью балластных объектов [6].

Еще одной важной характеристикой, которая выступает в роли ограничивающей, является сопротивление кабеля. Превышение допустимого сопротивления может привести к потере напряжения, потере структурной целостности оболочки кабеля из-за перегрева, и непосредственно к возгоранию. Сопротивление зависит от материала и размеров проводника, а также от условий размещения кабеля – длины и окружающей температуры.

Таким образом, оптимальность судовой кабельной сети в процессе проектирования может быть достигнуто путем комплексного подхода, включающего в себя учет сопротивления, массы и стоимости кабелей (рис. 1). В этом случае задача построения маршрутов кабелей сводится к задаче многокритериального выбора с эффективностью по Парето [10].

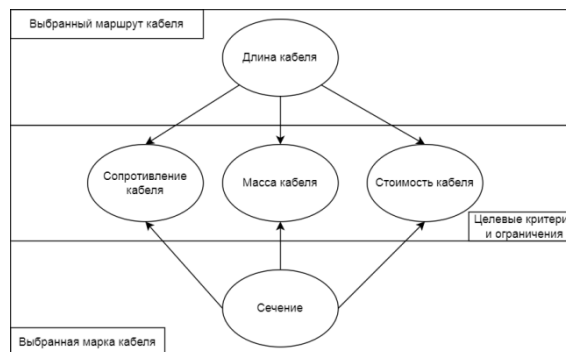


Рис. 1. Структура зависимостей характеристик кабеля.

Модель маршрутной сети для построения кабельных сетей

Для представления кабельной сети удобнее всего использовать структуру графа. Кабельная сеть представляет собой конечное множество кабелей, размещенных на маршрутной сети для подключения приборов между собой. Маршрутная сеть – промежуточное отображение допустимых вариантов размещения кабелей. Для построения маршрутной сети в проектом пространстве удобнее всего использовать алгоритм быстро растущих деревьев с эвристикой [7], позволяющий учесть большинство ограничений на прокладку кабеля уже на этапе поиска допустимых вариантов размещения кабелей. Тем самым уменьшается система ограничений задачи построения кабельной сети.

В терминах теории графов маршрутная сеть представляет собой конечный неориентированный связный граф $G(N, E)$, который может быть уложен в трехмерное пространство [8]. Маршрутный граф задают множества узлов $N = \{i = 1: |N|, |N| = n\}$,

представляющее уплотнительные конструкции, точки подключения к электрооборудованию, разветвления кабельной сети, а также множество ребер $E = \{e_1 = (n_1, n_2), \dots, e_q = (n_i, n_j)\}$, $E = \overline{1, |E|}$, $q = |E|$, соединяющие каждую конкретную пару узлов $n_i, n_j \in N$, где $(n_i, n_j) = (n_j, n_i)$ и $n_i \neq n_j$. E .

Множеству ребер соответствует матрица расстояний $L(N, N)$, в которой хранятся значения длин для ребер E маршрутного графа G . Элементы l_{ij} матрицы расстояний L задают расстояние между смежными узлами i и j .

Кабель в проектом пространстве судна может располагаться не только параллельно или перпендикулярно относительно основных координатных осей судна, но и под произвольным углом. Поэтому расстояние l_{ij} между смежными узлами маршрутного графа $G(N, M)$ может быть определено по формуле:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (1)$$

где (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) – координаты узлов i и j (соответственно, x – шпангоут, y – борт, z – палуба).

Также каждому ребру (i, j) множества E соответствует вектор пропускных способностей $D[E] = \{d_{12}, d_{23}, \dots, d_{ij}\}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, в элемент d_{ij} которого записывается значение пропускной способности ребра (i, j) по суммарному сечению кабелей. Пропускная способность задает сколько кабелей с определенным сечением может быть пропущена по ребру (i, j) маршрутной сети $G(N, E)$ и вычисляется по данным о пространственных коллизиях на пути прохождения ребра.

Постановка задачи построения кабельных сетей

Проектирование кабельной сети заключается в поиске пути для соединения двух приборов на маршрутной сети $G(N, E)$ с выбором марки кабеля определенного сечения, удовлетворяющей ограничениям по пропускной способности ребер и допустимого сопротивления.

Пусть задано множество соединений $W = \overline{1, |W|}$, где h -ое соединение устанавливает кабельную связь между парами точек маршрутной сети $w_h = (n_i, n_j)$, представляющими собой электрооборудования в проектом пространстве.

Для каждого соединения $w_h \in W$ определяется список допустимых вариантов марок кабеля $T_h = \{t_m^h(\phi_m^h, \delta_m^h, \rho_m^h, s_m^h)\}$, $T_h = \overline{1, |T^h|}$, определяющее m -ую допустимую марку кабеля для h -го соединения,

и в котором задаются такие характеристики каждой марки, как ϕ_m^h – удельный вес m -ой марки h -го соединения (кг*м), δ_m^h – удельная стоимость m -ой марки h -го соединения (у.е*м), ρ_m^h – удельное сопротивление m -ой марки h -го соединения (Ом*мм²/м), s_m^h – диаметр поперечного сечения m -ой марки h -го соединения (мм).

При подобном представлении объектов задачи множество марок T_h представляют собой декомпозицию кабеля по допустимым для применения маркам для h -го соединения, которые подбираются исходя из оптимальности применения, оцененного по целевым критериям. В дальнейшем множество соединений W и множество допустимых вариантов марок кабеля T_h при наложении на маршрутную сеть образуют вектор кабелей $P = \{p_1 = (w_1, t_1^1), \dots, p_k = (w_{h-1}, t_{m-1}^{h-1}), p_o = (w_h, t_m^h)\}$,

$P = \overline{1, O}$, $O = |P|$, представляющий собой множество пар вида (w_h, t_m^h) , где w_h – h -ое соединение,

наложенное на маршрутный граф, t_m^h – выбранная для h -го соединения m -ая марка кабеля, удовлетворяющая ограничениям на прокладку кабеля по построенному маршруту.

Для оценки оптимальности построенных маршрутов формируются матрицы стоимостей $C_m^h(N, N)$ и масс $A_m^h(N, N)$.

Матрицы стоимостей $C_m^h(N, N)$ хранят значения $c_m^h[i, j]$ общей стоимости h -го соединения m -ой марки кабеля длины l_m^h , вычисляемые по формуле:

$$c_{ij}^{hm} = \delta_m^h l_{ij}, \quad (2)$$

где δ_m^k – удельная стоимость m -ой марки h -го соединения, l_{ij} – длина ребра (i, j) , по которой проходит m -ая марка h -го соединения.

Матрицы масс $A_m^h(N, N)$ хранят значения $a_m^h[i, j]$ массы h -го соединения m -ой марки кабеля длины l_m^h , вычисляемые по формуле:

$$a_{ij}^{hm} = \phi_m^h l_{ij}, \quad (3)$$

где ϕ_m^k – удельная стоимость m -ой марки h -го соединения.

Для построения маршрута соединений W введем в рассмотрение вектор ограничений по интенсивности потока $B = \{b_1^{11}, b_2^{12}, b_3^{21}, \dots, b_i^{hm}\}$, в котором каждом узлу сети $i \in N$ приводится в соответствие h -ое соединение с m -ой маркой кабеля. Значение вектора ограничений b_i^{hm} принимает значения $b_i^{hm} = s_m^h$ – если i -ый узел является

начальным для h -го соединения m -ой маркой кабеля, $b_i^{hm} = -s_m^h$ – если i -ый узел является конечным для h -го соединения m -ой маркой кабеля, $b_i^{hm} = 0$ – если i -ый узел не является ни начальным, ни конечным.

Через x_{ij}^{hm} обозначим поток h -ого соединения m -ой маркой из узла i в узел j , который принимает значение $x_{ij}^{hm} = s_m^h$ – если маршрут h -ого соединения m -ой маркой кабеля проходит через ребро (i, j) и $x_{ij}^{hm} = 0$ – в противном случае.

При построении маршрута требуется учитывать ограничения на сопротивления кабеля, которые определяются электротехническими требованиями к подключаемым приборам. Для этого введем в рассмотрение вектор ограничений по допустимым значениям сопротивления

$R = (r_1, r_2, \dots, r_h, \dots), R = \overline{1, |W|}$, в котором для каждого h -го соединения в соответствии приводится допустимое сопротивление r_h .

Сопротивление m -ой марки h -го соединения можно найти по формуле [9]:

$$r_m^h = \rho_m^h \frac{l_m^h}{s_m^h}, \quad (4)$$

где r_m^h – удельное сопротивление m -ой марки h -го соединения ($\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), s_m^h – площадь поперечного сечения m -ой марки h -го соединения, l_m^h – длина маршрута h -го соединения m -ой марки.

Мы можем переписать формулу (4) следующим образом для вычисления сопротивления на отрезке (i, j) :

$$r_{ij}^{hm} = \rho_m^h \frac{l_{ij}}{x_{ij}^{hm}}, \quad (5)$$

где r_{ij}^{hm} – удельное сопротивление m -ой марки h -го соединения для ребра (i, j) ($\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$).

В задаче нахождения маршрутов и выбора марок кабелей требуется оптимизировать широкий набор марок кабеля в разрезе соединений, из которых в дальнейшем для h -го соединения выбирается только одна m -ая марка кабеля. С учетом обозначений нам потребуется продублировать ранее определенные векторы ограничений, чтобы исключить влияние разных марок кабеля друг на друга в пределах одного соединения.

Таким образом, данную можно сформулировать как двухкритериальную задачу линейного программирования транспортного типа [10]. Решение двухкритериальной транспортной задачи связано с нахождением компромиссных решений, которые достигают баланса между обоими целевыми функциями [11]:

$$\min F(X) = \begin{cases} f_1(X) = \sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{(i,j) \in E}^q c_{ij}^{hm} x_{ij}^{hm} \\ f_2(X) = \sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{(i,j) \in E}^q d_{ij}^{hm} x_{ij}^{hm} \end{cases} \quad (6)$$

при следующих ограничениях

– соблюдение баланса – обязательное размещение всех соединений различных марок кабеля на маршрутной сети $G(N, M)$, т.е. для каждого узла разность между суммой входящих и исходящих потоков должна равняться интенсивности ребра:

$$\sum_{i:(i,j) \in E}^q x_{ij}^{hm} - \sum_{j:(i,j) \in E}^q x_{ji}^{hm} = b_i^{hm}; \quad (7)$$

– соблюдение пропускной способности – суммарное сечение марок кабелей, маршрут которых проходит по ребру $(i, j) \in E$, не должно превосходить пропускную способность этого узла:

$$\sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} x_{ij}^{hm} + s_{ij}^{hm} = d_{ij}^{hm}, \quad (8)$$

где d_{ij}^{hm} – дублированное для каждой марки кабеля пропускная способность ребер, позволяющее учесть множество m -ых марок h -го соединения как одну, s_{ij}^{hm} – переменная рассогласования, преобразующая неравенство в равенство $s_{ij} > 0$;

– соблюдение ограничений на сопротивление – сумма сопротивлений h -го соединения m -ой марки не должно превышать допустимое сопротивление h -го соединения:

$$\sum_{(i,j) \in E}^q \rho_m^h \frac{l_{ij}}{x_{ij}^{hm}} + s_{ij}^{hm} = r_m^h, \quad (9)$$

где r_m^h – дублированное для каждой марки кабеля значение допустимого сопротивления h -го соединения;

– положительность потока – искомый поток каждого h -го соединения m -ой марки кабеля не может быть отрицательным:

$$x_{ij}^{hm} \geq 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, h = \overline{1, |W|}, m = \overline{1, |T_h|}. \quad (10)$$

Преобразование двухкритериальной задачи с помощью метода разложения Данцига-Вульфа

В связи со структурой матрицы условий задачи (6)-(10) целесообразно использовать подход блочного программирования, позволяющий распределить задачу на ряд подзадач меньшего объема, которые допускают использование специальных методов [12].

Метод разложения, предложенный Данцигом и Вульфом [13, 14], основан на разделении ограничений на блоки и преобразовании их в новую задачу с новыми переменными и допустимым количеством ограничений для упрощения решения.

Будем рассматривать ограничения исходной задачи (7), (9), представленными векторами B и R как единый блок ограничений $\Delta = \{B\} \cup \{R\}$.

Тогда в исходной задаче остаются два блока ограничений: к первому блоку относятся ограничения Δ , а ко второму блоку – ограничений по пропускной способности ребер D . В канонической форме записи ограничения задачи (7)-(9) принимают вид:

$$A^{(0)}X + S = \Delta, \quad (11)$$

$$A^{(1)}X + S = D, \quad (12)$$

$$X \geq 0, \quad (13)$$

где $A^{(0)}$ и $A^{(1)}$ – матрицы условий, советуемые блокам ограничений, Δ и D – блоки ограничений. Блок ограничений по методу разложения Данцига–Вольфа преобразуется из $\begin{pmatrix} \Delta \\ D \end{pmatrix}$ в $D' = \begin{pmatrix} 1 \\ D \end{pmatrix}$.

Предполагая ограниченность множества $X \geq 0$, определяемого матрицей D , обозначим вершины выпуклого многогранника, отвечающие условиям (11), (13) как $\{\pi_1^{hm}, \pi_2^{hm}, \dots, \pi_\gamma^{hm}, \dots, \pi_{v_{hm}}^{hm}\}$.

Точки $\pi_\gamma^{hm} = \|\pi_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm}$ являются геометрическими образами опорных планов задачи. Тогда любая точка x_{ij}^{hm} представляет собой выпуклую комбинацию его вершин, т.е.

$$\|x_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm} = \sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \lambda_\gamma^{hm} \|\pi_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm}, \quad (14)$$

где

$$\sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \lambda_\gamma^{hm} = 1, \quad (15)$$

$$\lambda_\gamma^{hm} \geq 0, \gamma = \overline{1, v_{hm}}. \quad (16)$$

Применив формулы (14)-(16) перейдем от переменных x_{ij}^{hm} в задаче (6)-(10) к переменным λ_γ^{hm} . Полагая известными $\{\dots, \pi_\gamma^{hm}, \dots\}$, получаем λ -задачу:

$$\min F(\lambda) = \begin{pmatrix} \sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \psi_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} \\ \sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \varphi_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \sigma_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} + s_{ij}^m = d_{ij}^m, \quad (18)$$

$$\sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \lambda_\gamma^{hm} = 1, \quad (19)$$

$$\lambda_\gamma^{hm} \geq 0, \gamma = \overline{1, v}, \quad (20)$$

где

$$\psi_{ij}^\gamma = \left(\sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^{hm} \|\pi_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm} \right),$$

$$\varphi_{ij}^\gamma = \left(\sum_{(i,j) \in E} d_{ij}^{hm} \|\pi_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm} \right),$$

$$\sigma_{ij}^\gamma = \left(\sum_{(i,j) \in E} (a_{ij}^{hm})^{(1)} \|\pi_{ij}^{hm}\|_\gamma^{hm} \right).$$

Двойственная к ней задача заключается в максимизации:

$$\max F(u) = \begin{pmatrix} \sum_{(i,j) \in E} d_{ij}^m u_{ij}^c + u_0^c \\ \sum_{(i,j) \in E} d_{ij}^m u_{ij}^a + u_0^a \end{pmatrix} \quad (21)$$

при условиях

$$\sum_{(i,j) \in E} \sigma_{ij}^\gamma u_{ij}^c + u_0^c = \psi_{ij}^\gamma, \gamma = \overline{1, v}, \quad (22)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} \sigma_{ij}^\gamma u_{ij}^a + u_0^a = \varphi_{ij}^\gamma, \gamma = \overline{1, v}, \quad (23)$$

$$u_{ij}^c, u_{ij}^a \geq 0, i = \overline{1, n}, \quad (24)$$

где u_{ij}^c, u_{ij}^a – векторы оценки условий задачи по целевым критериям c и a относительно текущего базиса, u_0^c, u_0^a – последняя компоненты векторов u_{ij}^c и u_{ij}^a , соответствующие условию (19) λ -задачи.

Каждому γ -ому опорному плану λ -задачи для проверки оптимальности можно привести двухкритериальную $X_{u^{c,a}}^k$. В $X_{u^{c,a}}^k$ -задаче можно преобразовать индексы коэффициентов по множествам соединений W и марок кабелей T_h в индексы множества кабелей P для чего $X_{u^{c,a}}^k$ -задачу решают для каждой пары (h, m) .

Преобразуются векторы ограничений Δ и множество образов опорных планов из Π^{hm} в $\Pi^k = \{\pi_1^k, \pi_2^k, \dots, \pi_\gamma^k, \dots, \pi_{v_k}^k\}$. Поскольку базисные решения двухкритериальных задач могут быть получены путем решения однокритериальных задач с взвешенной суммой [15], рассмотрим следующую параметрическую задачу линейного программирования, принимающую:

$$\min F(\mu) = \mu f_1(X_u^c) + (1 - \mu) f_2(X_u^a), \quad 0 < \mu < 1, \quad (25)$$

где $k = (h, m)$ – образованный индекс кабеля,

$f_1(X_u^c), f_2(X_u^a)$ – целевые функции $X_{u^{c,a}}^k$ -задачи:

$$f_1(X_u^c) = \sum_{(i,j) \in E} (c_{ij}^k - u_{ij}^c) x_{ij}^k - u_0^c,$$

$$f_2(X_u^a) = \sum_{(i,j) \in E}^q (a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a$$

Согласно теореме существования базисного решения [16] и в соответствии с (25) при $F(\mu) \geq 0$ для определения базисного решения вычисляется аргумент максимизации:

$$\mu' = \max \frac{-f_2(X_u^a)}{f_1(X_u^c) - f_2(X_u^a)}, f_1(X_u^c) \geq 0, f_2(X_u^a) < 0. \quad (26)$$

Базисное решение λ -задачи по (26) проверяется на оптимальность через (21)-(24) и $X_{u^{c,a}}^k$ -задачу.

Тогда перейдем от двухкритериальной $X_{u^{c,a}}^k$ -задаче к X_u^k -задаче дробно-линейного программирования, в которой для каждого k -го кабеля требуется вычислить:

$$\max F(x^k) = \sum_{(i,j) \in E}^q \frac{-((a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a)}{((c_{ij}^k - u_{ij}^c) x_{ij}^k - u_0^c) - ((a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a)}$$

при ограничениях

$$\sum_{i:(i,j) \in E}^q x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j) \in E}^q x_{ji}^k = b_i^k,$$

$$\sum_{(i,j) \in E}^q \rho_k \frac{l_{ij}}{x_{ij}^k} + s_{ij}^k = r_k,$$

$$(c_{ij}^k - u_{ij}^c) x_{ij}^k - u_0^c \geq 0,$$

$$(a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a < 0,$$

$$s_{ij}^k, x_{ij}^k \geq 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, o},$$

где $c_{ij}^k - u_{ij}^c$, $a_{ij}^k - u_{ij}^a$ – коэффициенты линейной формы задачи $X_{u^{c,a}}^k$ -задачи; u_{ij}^c , u_{ij}^a – относительные оценки условий задачи.

Применим метод преобразование Чарнса-Купера [17], преобразующий задачу дробно-линейного программирования в задачу линейного программирования, который вводит специальную структуру ограничений в задачу. Решив полученную задачу линейного программирования путём обратного преобразования, получаем решение X_u^k -задачи:

$$\max F(y^k) = - \sum_{(i,j) \in E}^q (a_{ij}^k - u_{ij}^a) y_{ij}^k - u_0^a \omega$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n y_{ij}^k - \sum_{i=1}^n y_{ji}^k = b_i^k \omega,$$

$$\sum_{(i,j) \in E}^q \rho_k \frac{l_{ij}}{y_{ij}^k} + s_{ij}^k = r_k \omega,$$

$$(c_{ij}^k - u_{ij}^c) y_{ij}^k - u_0^c \omega \geq 0,$$

$$(a_{ij}^k - u_{ij}^a) y_{ij}^k - u_0^a \omega < 0,$$

$$((c_{ij}^k - u_{ij}^c) y_{ij}^k - u_0^c \omega) - ((a_{ij}^k - u_{ij}^a) y_{ij}^k - u_0^a \omega) = 1,$$

$$\omega \geq 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, w},$$

где

$$y_{ij}^k = \frac{1}{((c_{ij}^k - u_{ij}^c) x_{ij}^k - u_0^c) - ((a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a)} x_{ij}^k,$$

$$\omega = \frac{1}{((c_{ij}^k - u_{ij}^c) x_{ij}^k - u_0^c) - ((a_{ij}^k - u_{ij}^a) x_{ij}^k - u_0^a)}.$$

Решением X_u^k -задачи будет π_{ij}^k ,

соответствующее оптимальному решению λ -задачи для кабеля $k = (h, m)$. Решение исходной задачи вычисляется по формуле (14).

Метод последовательного улучшения плана для решения двухкритериальной задачи

Метод последовательного улучшения плана (симплекс метод), был предложен Данцигом в 1947 г. для решения задач линейного программирования [18]. Метод определяет оптимальный план через последовательное улучшение опорного плана. Данциг доказал, что при невырожденных условиях задачи через конечное число итераций можно получить оптимальное решение. Также метод позволяет проверить противоречивость исходных ограничений задачи.

Для решения двухкритериальной задачи маршрутизации кабелей с подбором марок применяется двухкритериальный метод последовательного улучшения плана [16], блок-схема которого представлена на рис. 2.

Пусть базисные переменные опорного плана, соответствующие базису векторов, называются базисными B , а остальные – небазисными $N = \{1 \dots n\} \setminus B$. Тогда X_t , $t = ((h, m), (i, j)) \in B$ – базисное допустимое решение, X_s , $s = ((h, m), (i, j)) \in N$ – небазисное.

Симплексный метод начинается с произвольного допустимого решения и ищет оптимальное, переходя от одного базисного допустимого решения $(x_{ij}^{hm})_B \in X_B$ к другому в направлении уменьшения целевых функций, пока не достигнет оптимального базисного решения.

Произведём описание основных шагов двухкритериального метода решения задачи:

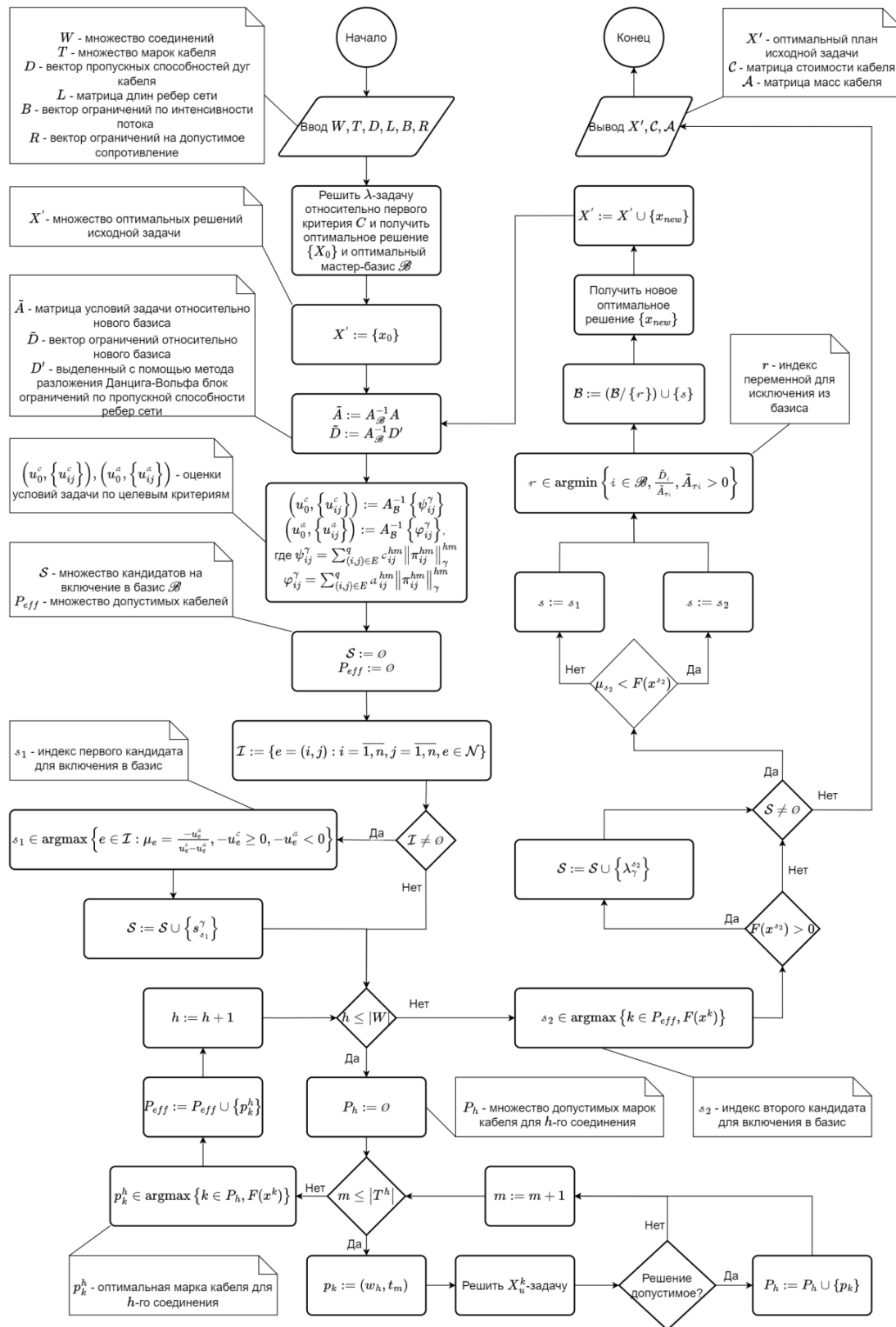


Рис. 2. Блок-схема метода решения задачи маршрутизации кабелей с подбором марок

1. Определяется начальный опорный план путем решения λ -задачи относительно первого целевого критерия C с помощью обычно симплекс-метода

[18]. Получаем оптимальный мастер-базис B и допустимое решение $X_0 = (X_B, 0)$.

2. После обновления базиса пересчитываем матрицу условий $\tilde{A}$ и вектор ограничений $\tilde{D}$ для анализа влияния новых переменных по формулам

$$\tilde{A} = A_B^{-1}A,$$

$$\tilde{D} = A_B^{-1}D',$$

где A_B – матрицы условий A в текущем базисе.

Также находим векторы оценки условий по целевым критериям согласно условиям двойственной задачи (22), (23):

$$\sum_{(i,j) \in E} \sigma_{ij}^{\gamma} u_{ij}^c + u_0^c = \psi_{ij}^{\gamma} \Rightarrow (u_0^c, \{u_{ij}^c\}) = A_B^{-1} \{\psi_{ij}^{\gamma}\},$$

$$\sum_{(i,j) \in E} \sigma_{ij}^{\gamma} u_{ij}^a + u_0^a = \psi_{ij}^{\gamma} \Rightarrow (u_0^a, \{u_{ij}^a\}) = A_B^{-1} \{\psi_{ij}^{\gamma}\}.$$

3. Определяется первый индекс-кандидат для включения в базис. Выбирается $e = (i, j) \in N$ для включения в базис путем оценки соотношения улучшения второго критерия к ухудшению первого по производной от (26) формуле:

$$\mu_e = \max_{e=(i,j) \in N} \frac{-u_e^a}{u_e^c - u_e^a}$$

Небазисная переменная рассогласования s_e^{γ} , достигающего максимального значения μ_e , будет являться кандидатом на добавление в базис.

4. Определяется второй индекс-кандидат для включения в базис. Решается X_U^k -задача для каждого h -го соединения m -ой марки путем перехода к $p_k = (w_h, t_m)$ с помощью симплекс-метода [18].

Для h определяется единственная марка, обеспечивающая максимальное значение целевой функции. Небазисная переменная λ_{γ}^k , также добавляется в список кандидатов для включения в базис.

6. Для предотвращения обнуления $x_{t,t} \in B$, необходимо исключить индекс $r \in B$ из базиса. Индекс l исключается, если достигает минимального значения в

$$\eta_r = \min_{t \in B} \frac{\tilde{D}_t}{\tilde{A}_{st}}$$

где $\tilde{A}_{st} > 0$ – значение матрицы условий $\tilde{A}$ на S -ой строке и t -ом столбце.

7. Если есть кандидаты на включение в базис, то формируется новый базис $B = (B \setminus \{r\}) \cup \{s\}$,

определяется новый опорный план π_{γ} , улучшающий значения целевых функций, и итерация повторяется с п.2. В противном случае, если нет кандидатов для включения, опорный план преобразуется в решение исходной задачи по формуле (14). **Уточнение спроектированной модели кабельных сетей за счет реальных данных**

Точное проектирование судовых кабельных сетей требует готовности к корректировкам в проекте на этапе постройки судна из-за несовпадения проектной и реальной длины кабелей. По формуле (1) длина

для отрезка сети l_{ij} моделируется по формуле

вычисления расстояния между точками n_i, n_j в пространстве. Реальная длина же зависит от качества выполнения электромонтажных работ и может увеличиться из-за провисаний, растяжений и изгибов кабеля.

Для компенсации разрыва предлагается подход, который предполагает предварительные замеры и уточнения длин кабелей в реальных условиях перед выполнением электромонтажных работ. Замеренная длина кабеля сообщается проектировщику перед выполнением электромонтажных работ. Проектировщик на основании переданной длины принимает решение либо о построении другого оптимального маршрута кабеля и вносит корректировки во входные параметры описанного метода, либо утверждает передаваемые длины.

Предположим, что в силу технических характеристик m -ых марок кабелей, применяемых во множестве соединений W , условия прокладки кабеля на разных маршрутах будут приблизительно одинаковыми. Тогда для приближения проектных длин незамеренных кабелей к реальным длинам в спроектированной модели можно использовать специальный коэффициент среднего отклонения $k_{откл}^m$, вычисляемый через разность между замеренной и проектной длиной m -ых марок кабелей:

$$k_{откл}^m = \frac{\sum_{k_m=1}^{N_{зам}^m} |l_{зам}^m - l_{пр}^m|}{N_{зам}^m},$$

где $l_{зам}^m$ – замеренная длина k -го кабеля m -ой марки, $l_{пр}^m$ – проектная длина k -го кабеля m -ой марки, $N_{зам}^m$ – кол-во замеренных кабелей m -ой марки.

Применение коэффициента $k_{откл}^m$ в формулах, используют в качестве параметра длины l_{ij} , т.е. при вычислении стоимости c_{ij}^{hm} (2), массы a_{ij}^{hm} (3) и сопротивления r_{ij}^{hm} (4) для тех кабелей, которые еще не были замерены, позволяет повысить точность проектных длин кабеля и снизить их разрыв с реальными:

$$c_{ij}^{hm} = \delta_m^h \times k_{откл}^m \times l_{ij}$$

$$a_{ij}^{hm} = \varphi_m^h \times k_{откл}^m \times l_{ij}$$

$$r_{ij}^{hm} = \rho_m^h \frac{k_{откл}^m \times l_{ij}}{s_m^h}$$

После умножения проектных длин кабелей на коэффициент $k_{откл}^m$ в данных формулах алгоритм последовательного улучшения плана должен быть выполнен снова. Процесс проектирования при данном подходе будет иметь циклический спиралевидный характер: точность спроектированной модели кабельных сетей будет постоянно уточняться за счет реальных данных, а сама модель дорабатываться на следующих циклах уточнения длин.

Заключение

В связи с постоянно растущими требованиями процесс проектирования судовых кабельных сетей требует разработки новых подходов, которые бы обеспечивали безопасность и отказоустойчивости судов, а также экономическую эффективность их постройки.

Описанная модель двухкритериальной задачи линейного программирования транспортного типа для построения судовых кабельных сетей, позволяет учесть ограничения на допустимое сопротивление соединений и пропускную способность кабельных трасс. Критерии целевых функций по стоимости и массе размещаемых кабелей представляются не единственными и могут быть изменены на другие или адаптированы под конкретные показатели того или иного проекта судна. В таком случае, в

двухкритериальном методе последовательного улучшения плана вычисления требуется проводить с выбранными критериями.

Недостатком описанного подхода является представление длины кабеля как прямой, что снижает точность проектных длин кабеля относительно реальных. Для повышения точности предлагается метод уточнения длин за счет использования специального коэффициента, вычисляемого на основе реальных данных о длинах. Так проектирование кабельных сетей с помощью построенной модели приобретает циклический спиралевидный характер.

В дальнейшем целесообразно провести работы, направленные на создание и дальнейшее совершенствование модельно-алгоритмического и программного обеспечения решения описанной задачи проектирования кабельных сетей.

Литература

1. Lin C., Rao L., D'Ambrosio J., and Sangiovanni-Vincentelli A. Electrical Architecture Optimization and Selection - Cost Minimization via Wire Routing and Wire Sizing // SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2014. vol. 7(2). pp. 502-509.
2. Karlsson T. Optimization of Cable Harness Routing – Mathematical Modelling, Lagrangian Relaxation, and Subgradient Optimization // Department of Mathematical Sciences – Chalmers University of Technology. 2020. 42 p.
3. Бердичевский Л.Д., Марченко В.А. Автоматизированное проектирование судовых кабельных сетей // Ленинград : Судостроение. 1978. 214 с.
4. Носков С.И., Рязанцев А.И. Двухкритериальная транспортная задача // T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. 2019. № 13(2). С. 59-63.
5. Moradi S., Raith A., Ehrgott M. A bi-objective column generation algorithm for the multi-commodity minimum cost flow problem // European Journal of Operational Research. 2015. vol. 244(2). pp. 369-378.
6. Genick B.M. Stability of Ships and Other Bodies. Potto Project . 2021. 197 p.10. Пиявский, С.А. Новые методы принятия многокритериальных решений в цифровой среде. Москва : Наука. 2022. 370 с.
7. Гусак Е.В., Гурьев А.Т. Использование маршрутной сети для представления корабельных кабельных трасс // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2023. № 1(104). С. 12-17.
8. Асанов М.О., Баранский В.А., Расин В.В. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы // Ижевск : НИЦ "РХД". 2001. 288 с.
9. Расчет сопротивлений проводов. URL: <https://electricschool.info/main/sovety/1084-raschet-soprotivlenijj-provodov.html> (дата обращения: 10.03.2024).
10. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. Кн. 3: Задачи транспортного типа // М. : КРАСАНД. 2022. 182 с.
11. Vanderbei R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions // International Series in Operations Research & Management Science, 5th ed. : Springer. 2020. 500 p.
12. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Специальные направления в линейном программировании // М. : КРАСАНД. 2018. 526 с.
13. Dantzig G.B., Wolfe P. Decomposition algorithm for linear programs // Econometrica. 1961. vol. 29(4). pp. 767–778
14. Dantzig G.B., Wolfe P. Decomposition principle for linear programs // Oper. Res. 1960. vol. 8(1). pp. 101-112.
15. Isermann, H. Proper efficiency and the linear vector maximum problem // Oper. Res. 1974. vol. 22(1). pp. 189–191.
16. Ehrgott, M. Multicriteria optimization // Berlin : Springer, 2nd edition. 2005. 336 p.
17. Ota, R. R., Tripathy, S., Nayak, M. M. A Case Study on Solutions of Linear Fractional Programming Problems // International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2023. vol. 4(3), pp. 1-10.
18. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование: Теория, методы и приложения // М. : КРАСАНД. 424 с.

References

1. Lin C., Rao L., D'Ambrosio J., and Sangiovanni-Vincentelli A. Electrical Architecture Optimization and Selection - Cost Minimization via Wire Routing and Wire Sizing. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2014. vol. 7(2). pp. 502-509.
2. Karlsson T. Optimization of Cable Harness Routing – Mathematical Modelling, Lagrangian Relaxation, and Subgradient Optimization. Department of Mathematical Sciences – Chalmers University of Technology. 2020. 42 p.
3. Berdichevskij L.D., Marchenko V.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudovyh kabel'nyh setej [Automated design of ship cable networks]. Leningrad : Sudostroenie. 1978. 214 p.
4. Noskov S.I., Rjazancev A.I. [Bi-objective transportation problem]. T-Comm - Telekommunikacii i Transport. 2019. vol 13(2). pp. 59-63.

5. Moradi S., Raith A., Ehrgott M. A bi-objective column generation algorithm for the multi-commodity minimum cost flow problem. *European Journal of Operational Research*. 2015. vol. 244(2). pp. 369-378.
6. Genick B.M. Stability of Ships and Other Bodies. *Potto Project*. 2021. 197 p.
7. Gusak E.V., Gur'ev A.T. [Using a route network to represent ship cable routes]. *Evrasijskij Sojuz Uchenyh. Serija: tehniicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2023. vol 1(104). pp. 12-17.
8. Asanov M.O., Baranskij V.A., Rasin V.V. *Diskretnaja matematika: grafy matroidy, algoritmy* [Discrete mathematics: graphs, matroids, algorithms]. Izhevsk : NIC "RHD". 2001. 288 p.
9. Raschet soprotivlenij provodov. [Calculation of wire resistance]. Available at: <https://electricalschool.info/main/sovety/1084-raschet-soprotivlenijj-provodov.html>. (accessed 10.03.2024).
10. Judin D.B., Gol'shtejn E.G. *Zadachi i metody linejnogo programmirovaniya*. Kn. 3: *Zadachi transportnogo tipa*. [Problems and methods of linear programming. Book 3: Transportation type problems]. M. : KRASAND. 2022. 182 p.
11. Vanderbei R. J. *Linear Programming: Foundations and Extensions*. International Series in Operations Research & Management Science, 5th ed. : Springer. 2020. 500 p.
12. Gol'shtejn E.G., Judin D.B. *Special'nye napravleniya v linejnom programmirovanii* [Special directions in linear programming] // M. : KRASAND. 2018. 526 p.
13. Dantzig G.B., Wolfe P. Decomposition algorithm for linear programs. *Econometrica*. 1961. vol. 29(4). pp. 767–778
14. Dantzig G.B., Wolfe P. Decomposition principle for linear programs. *Oper. Res*. 1960. vol. 8(1). pp. 101-112.
15. Isermann, H. Proper efficiency and the linear vector maximum problem. *Oper. Res*. 1974. vol. 22(1). pp. 189–191.
16. Ehrgott, M. *Multicriteria optimization*. Berlin : Springer, 2nd edition. 2005. 336 p.
17. Ota, R. R., Tripathy, S., Nayak, M. M. A Case Study on Solutions of Linear Fractional Programming Problems. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2023. vol. 4(3), pp. 1-10.
18. Judin D.B., Gol'shtejn E.G. *Linejnoe programmirovanie: Teorija, metody i prilozheniya* [Linear Programming: Theory, Methods and Applications]. M. : KRASAND. 424 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гусак Евгений Витальевич, аспирант, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e-mail: Alphaplayer@yandex.ru

Evgeny V. Gusak, graduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: Alphaplayer@yandex.ru

Гурьев Александр Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и информационной безопасности Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, e-mail: atg1i@rambler.ru

Alexander T. Guryev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: atg1i@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.04.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.05.2023.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.020>**Методика оценки информационной среды на основе модифицированного реально-виртуального континуума**Бурылин Я.В.¹ y.burylin@gmail.com, Попов А.Н.¹ an.popov.mga@gmail.com¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье выполнен анализ базового варианта реально-виртуального континуума, включая оценку столкновения судов при маневрировании. Произведены экспериментальные исследования в среде дополненной реальности с использованием мобильной голографической системы. В качестве экспертов были задействованы лица старшего командного состава (опыт работы в море более 10 лет) экипажей торговых судов как отечественных так и зарубежных компаний. Авторы, в сравнении с другими методами анализа аварийности, предприняли попытку адаптировать оригинальную методику «человеко-ориентированного» интерфейса для исследования влияния информационной среды на процесс принятия решения человеком-оператором (судоводителем) морской эргатической системы. Разработан модифицированный реально-виртуальный континуум. Разработан метод оценки качества восприятия в морской навигационной системе дополненной реальности. Разработана и апробирована методика оценки влияния информационной среды на скорость и качество принимаемых решений.

Ключевые слова: эргатические системы, реально-виртуальный континуум, интерфейс, дополненная реальность, виртуальная реальность.

Для цитирования: Бурылин Я.В., Попов А.Н. Методика оценки информационной среды на основе модифицированного реально-виртуального континуума, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 173—180. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.020

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.020>**Methodology for assessing the information environment based on a modified real-virtual continuum**Yaroslav V. Burylin¹ y.burylin@gmail.com, Anatoliy N. Popov¹ an.popov.mga@gmail.com¹Admiral F.F. Ushakov State Maritime University

Abstract. The article analyzes the basic version of the real-virtual continuum, including assessing the collision of ships during maneuvering. Experimental studies were carried out in an augmented reality environment using a mobile holographic system. Senior officers (more than 10 years of experience at sea) were involved as experts. The authors, in comparison with other methods of accident analysis, made an attempt to adapt the original methodology of the “human-oriented” interface to study the influence of the information environment on the decision-making process of a human operator (navigator) of a marine ergatic system. A modified real-virtual continuum has been developed. A method for assessing the quality of perception in an augmented reality marine navigation system has been developed. A methodology for assessing the influence of the information environment on the speed and quality of decisions made has been developed and tested.

Keywords: ergatic systems, real-virtual continuum, interface, augmented reality, virtual reality.

For citation: Yaroslav V. Burylin, Anatoliy N. Popov, Methodology for assessing the information environment based on a modified real-virtual continuum, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 173—180. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.020

Введение

По аналогии с программой IMO «Humanization of Conventions» – «очеловечивание Конвенций» авторы предлагают методику «человеко-ориентированного» интерфейса, которая включает в себя следующие направления:

- определение информационной среды, которая позволит реализовать идею информационного подхода применительно к морской эргатической системе;

- разработка информационного стандарта, который обеспечит необходимые условия для восприятия и обработки цифровой информации;

- разработка нормативно-правовой базы, которая позволит использовать данную концепцию на конвенционных морских судах.

В отличие от существующих методов, рассматривающих частные аспекты функционирования эргатической системы, предлагается системное исследование, включающее использование вышеуказанного информационного подхода, модели зрительной системы человека-оператора и особенностей восприятия информации в среде смешанной реальности [1-15].

На переработку информации человеком-оператором (судоводителем) влияют три группы факторов: объективные характеристики сообщений и сигналов, условия деятельности и индивидуальные

характеристики человека. Следует отметить, что существует разница между восприятием аналоговой и цифровой информации судоводителем. В этой связи среда определяет соотношение аналогового и цифрового сигнала, соотношение релевантной (полезной) и иррелевантной (бесполезной при решении конкретной задачи) информации. В работе предлагается исследовать качество интерфейса пользователя с учетом информационной энтропии среды принятия решений от RE (real environment – реальная среда) до AR (augmented reality – дополненная реальность), включая AV (augmented virtuality – дополненная виртуальность). В качестве критериев количественной оценки используются:

- время принятия решения,
- когнитивная нагрузка,
- качество восприятия.

Модификация реально-виртуального континуума

Для количественной оценки влияния информационной среды предлагается использовать модифицированный вариант РВК в формате информационно-онтологического континуума (Рисунок 1).

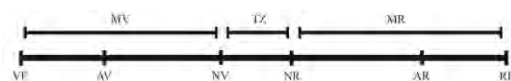


Рис. 1 – Информационно-онтологический континуум

Информационно-онтологический континуум позволяет уточнить ряд существующих компонентов, а также ввести новые, а именно:

RE – среда реального окружения, 100% аналоговые данные;

AR – среда дополненной реальности, например, 80% аналоговых данных и 20% цифровых данных, находящихся в поле визуального наблюдения;

VE – среда виртуального окружения, 100% цифровые данные;

AV – среда дополненной виртуальности, например, 80% цифровых данных и 20% аналоговых данных, находящихся в поле визуального наблюдения;

NR – среда нейтральной реальности, 50% аналоговых данных и 50% цифровых данных, находящихся в поле визуального наблюдения, с тенденцией уменьшения аналоговых данных от состояния 100% до состояния 50%;

NV – среда нейтральной виртуальности, 50% цифровых данных и 50% аналоговых данных, находящихся в поле визуального наблюдения, с тенденцией уменьшения цифровых данных от состояния 100% до состояния 50%;

MR – среда смешанной реальности, например, диапазон от 51% аналоговых данных и 49% цифровых данных до 99% аналоговых данных и 1% цифровых данных, находящихся в поле визуального наблюдения;

MV – среда смешанной виртуальности, например, диапазон от 99% цифровых данных и 1% аналоговых данных до 51% цифровых данных и 49% аналоговых данных, находящихся в поле визуального наблюдения;

TZ – зона перехода, например, диапазон

значений, находящихся между средой нейтральной виртуальности и средой нейтральной реальности.

Для определения положения информационной среды (зоны) на РВК предлагается ввести допущение о количественном соотношении аналоговой и цифровой информации, как это показано на рисунке 1.

Разработка метода оценки качества восприятия в морской системе дополненной реальности

Насыщенность современных судов техническими средствами судовождения (РЛС, САРП, ЭКНИС, АИС) обуславливает разрыв между психофизиологическими возможностями человека-оператора (судоводителя) и все возрастающим объемом информации, который необходимо переработать в короткий срок для принятия правильных решений в различных ситуациях. Эффективное использование информации возможно только при условии автоматизации ее обработки и представлении судоводителю в виде, удобном для восприятия и последующего принятия решения. Поэтому предлагается оценить качество восприятия в системе дополненной реальности. Сегодня отсутствуют общепринятые стандарты информационной среды ДР и методы оценки качества восприятия навигационных данных.

Для оценки качества восприятия человеком-оператором (судоводителем) в среде ДР выбран коэффициент Хёрста. Чтобы измерить (количественная оценка) коэффициент Хёрста для услуг ДР, необходимо перехватить и проанализировать трафик, генерируемый приложением ДР. Для этого на базе лаборатории «Технологий виртуальной реальности» ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова было организовано соединение между сервером и устройством ДР (голографический компьютер).

Для оценки QoE и QoS достаточно двух характеристик, перехваченных пакетов – времени и размера. После того, как определены и записаны значения этих параметров, можно перейти к количественной оценке (обработка данных). Для определения качества восприятия данной сети будем использовать вышеуказанный коэффициент Хёрста. Для того, чтобы коэффициент Хёрста стал точнее, перехват пакетов осуществлялся в течение 1 минуты. Для временных рядов в 1 минуту были вычислены дисперсии по формуле

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2. \quad (1)$$

Дисперсия характеризует квадрат возможного отклонения случайной величины от ее среднего значения. Чтобы точнее определить коэффициент Хёрста, интервал временного ряда был изменен с 1 мс до 10, 100 и 1000 мс. Зная этот параметр (H_u), можно оценить степень самоподобия агрегированного процесса видеотрафика, что характеризует качество восприятия дополненной реальности. Пусть x – случайная дискретная величина $\{x_i\}$ трафика при некотором временном интервале, где x_i – число ошибок при перехвате i -го пакета. Агрегированный процесс $x^{(m)}$

осуществляется блоками с размерностью m (иногда m это число байтов). Для самоподобного процесса Г. Хёрст нашел наличие связи между агрегированным процессом $x^{(m)}$ и однопакетным x , т.е.

$$m^{1-Hu} x^{(m)} : x, \quad (2)$$

где Hu – коэффициент Хёрста.

Далее, анализ фрактальных свойств видеопотока проводится через сравнение дисперсий

$$D(x^m) : m^{2(Hu-1)} D(x). \quad (3)$$

Логарифмируя, получим

$$\lg D(x^m) : 2(Hu-1) \lg m + \lg D(x). \quad (4)$$

Очевидно, здесь имеется линейное поведение дисперсии агрегированного процесса в логарифмических осях, т.е.

$$\lg D(x^m) : a \lg m + b. \quad (5)$$

Далее методом наименьших квадратов (МНК) вычисляем коэффициенты a и b , аппроксимируя

прямой $y = ax + b$ значения $\lg D(x^m)$, полученные в эксперименте по перехвату блоков по m пакетов.

Из равенства $2(Hu-1) = a$ следует формула Хёрста

$$Hu = 1 + \frac{a}{2} \quad (6)$$

где $-1 < a < 0$,

$a = \operatorname{tg} \varphi$, φ – угол наклона прямой к горизонтальной оси на рисунке 2.

Ограничение $0,5 < Hu < 1$ на коэффициент Хёрста обеспечивает сохранение самоподобия трафика и, в конечном итоге, характеризует одинаковое восприятие «картинки» дополненной реальности судоводителями.

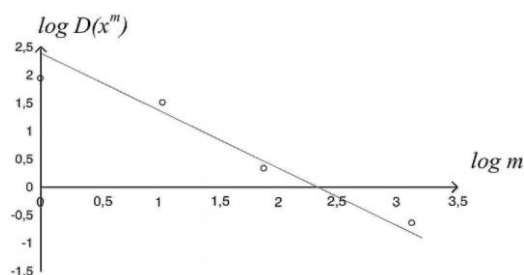


Рис. 2 – Линейное поведение агрегированного процесса, полученное с помощью метода наименьших квадратов (МНК)

С использованием разработанного ПО был произведен эксперимент по оценке качества восприятия в среде ДР. Был выполнен перехват пакетов и их обработка при различных сценариях – без помех, с задержками, с потерями, уменьшением пропускной способности. В качестве экспертов были выбраны судоводители с опытом работы в море более 10 лет. За эталон был принят эксперимент без введения помех. Соответственно в варианте «эталон» все параметры близки к оценке 5 баллов. Необходимо было получить их индивидуальные оценки о плавности, скорости движения и частоты обновления кадра в новой среде взаимодействия пользователя морской системы дополненной реальности.

Сценарий 1. С задержками (Таблица 2).

Таблица 2

Характеристика	Задержка				
	50 мс	25 мс	15 мс	10 мс	5 мс
Частота обновления кадра	3	4	5	5	5
Скорость движения	1	3	4	4	5
Плавность движения	4	5	5	5	5
Скорость передачи данных, кбит/с	6–8	11–13	15–17	18–22	23–26
Коэффициент Хёрста	0.461	0.524	0.560	0.604	0.608

Вывод: субъективная оценка экспертов показала, что задержки в 5 мс не оказывают негативного влияния на качество восприятия информации (данных) в среде ДР. При задержке пакетов на 10–15 мс ухудшается восприятие скорости движения объекта, при больших задержках начинает уменьшаться частота обновления кадра. Для каждой величины задержки были измерены пропускная способность и коэффициент Хёрста. Из Таблицы 2 видно, что максимальный коэффициент Хёрста соответствует наилучшей оценке качества восприятия. Это означает, что трафик самоподобен и увеличения задержки, а, следовательно, и падения качества восприятия, не произойдет с такой же вероятностью, насколько Hu стремится к 1. В соответствии с результатами эксперимента (сценарий 1), приведенными в Таблице 2, в морской системе дополненной реальности пользователь (судоводитель) может воспринимать информацию (данные) с задержкой до 5 мс. В этой связи

коэффициент Хёрста можно использовать для оценки качества восприятия при задержках.

Сценарий 2. С потерями пакетов (таблица 3).

Таблица 3

Характеристика	Потери			
	10 %	5 %	2 %	1 %
Частота обновления кадра	1	1	2	3
Скорость движения	1	2	4	5
Плавность движения	1	1	2	2
Скорость передачи данных, кбит/с	8–10	11–13	14–16	17–20
Коэффициент Хёрста	0.571	0.525	0.577	0.619

Вывод: потери пакетов негативно сказываются на оценке качества восприятия пользователей морской системы дополненной реальности. Даже при 1 % потерятных пакетов не достигается наивысшей субъективности оценки качества. Больше всего подвержены воздействию частота обновления кадров и плавность движения виртуальных объектов. Следовательно, пользователь (судоводитель) будет воспринимать изображение рывками, также он будет наблюдать долгий отклик сцены на движение пользователя, например, поворот головы в очках ДР. При этом коэффициент Хёрста остается больше 0,5. Поэтому можно сделать вывод, что коэффициент Хёрста не рекомендуется использовать для корреляции QoE и QoS при наличии потерь пакетов.

Сценарий 3. С понижением пропускной способности (таблица 4).

Таблица 4

Характеристика	Пропускная способность			
	5 кбит/с	10 кбит/с	20 кбит/с	30 кбит/с
Частота обновления кадра	2	4	5	5
Скорость движения	1	1	5	5
Плавность движения	5	5	5	5
Коэффициент Хёрста	0.481	0.524	0.577	0.588

Вывод: пропускная способность канала влияет на оценку качества восприятия информации (данных) в среде ДР. Для надежной работы пользователя морской системы дополненной реальности достаточной пропускной способностью канала является показатель равный 30 кбит/с. При снижении пропускной способности страдает скорость передвижения объекта. Коэффициент Хёрста отображает зависимость оценки качества восприятия от оценки качества обслуживания при таком показателе качества, как пропускная

способность. В ходе выполнения эксперимента в диссертационной работе решались следующие задачи. Определение количества измерений одного и того же параметра, чтобы математическое ожидание ансамбля экспериментальных данных отличалось от истинного значения не более, чем на заданную величину. С этой целью на первом этапе проведено, вероятнее всего, заведомо большее число экспериментов (170) с каждым из 15 экспертов, участвующих в эксперименте. При этом были приняты все возможные меры, исключающие их взаимодействия между собой. Первым параметром были значения частоты обновления кадра при временной задержке в 50 мс. В результате экспериментов было получено 2550 значений частоты обновления кадра. Для более полной картины на Рисунке 3 показаны результаты всех оценок двух экспертов.

Из анализа подобных графиков для всех 15 экспертов можно сделать экспресс-оценку: в среднем, частота обновления кадра оценивается тремя баллами. Однако для достоверной оценки следует убедиться, что каждый эксперт проводил измерения независимо от других, т.е. между их оценками отсутствует корреляция. Степень связи данных оценивается коэффициентом корреляции $r_{x,y}$:

$$r_{x,y} = \frac{\mu_{x,y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (7)$$

где $\mu_{x,y}$ – корреляционный момент совокупности $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_K, x_{170})$ значений, измеренных экспертом №1, и совокупности $Y(y_1, y_2, y_3, \dots, y_K, y_{170})$ значений, измеренных экспертом №2;

σ_x и σ_y – средние квадратические отклонения наборов данных X и Y.

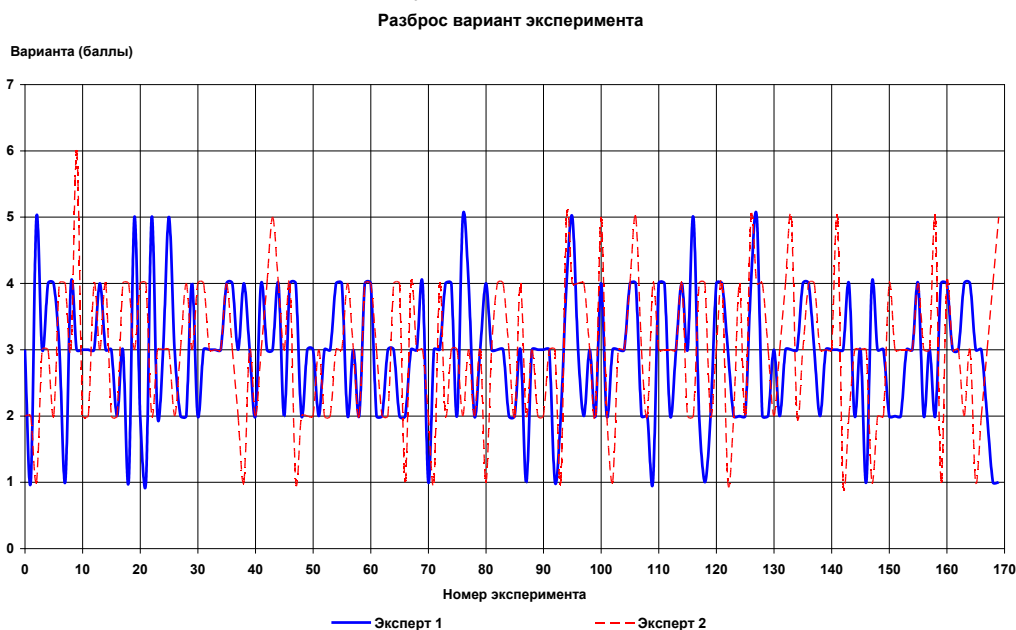


Рис. 3 – Оценки частоты обновления кадра

В свою очередь, корреляционный момент совокупности случайных данных X и Y представляет собой математическое ожидание произведения отклонений этих данных от среднего значения:

$$\mu_{x,y} = M\{[X - M(X)] \cdot [Y - M(Y)]\}. \quad (8)$$

Расчёт объёма выборки

В теории эксперимента показано, что разброс измеренных значений по мере увеличения количества измерений (выборка) всё меньше и меньше сказывается на результате усреднения данных, стремящихся в пределе к математическому ожиданию случайных измерений. Целесообразно определить требуемое количество измерений,

обеспечивающих сходимость усреднённого значения измеряемого параметра к математическому ожиданию с требуемой точностью. Так, в пакете MS Excel проведены расчёты среднего значения параметра (оценки частоты обновления кадра по 5-балльной системе) по мере увеличения объёма выборки от 1 до 170, т.е. полного количества экспериментов одного эксперта:

$$X_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad N = 1 \dots 170. \quad (9)$$

Графическая зависимость сходимости среднего значения приведена на рисунке 4

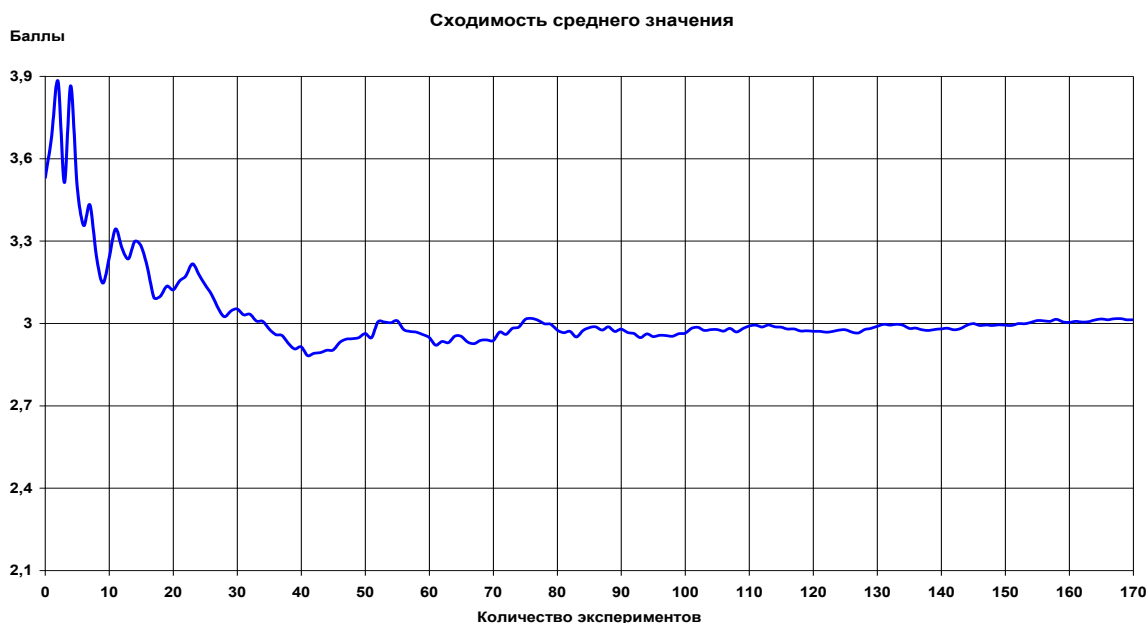


Рис. 4 – Сходимость среднего значения

Для количественной оценки графической зависимости можно применить границы возможных изменений параметров, принятые в теории измерений. Так, можно установить границы возможного изменения среднего значения – не более 10 % от абсолютного значения. Судя по графику на Рисунке 3, результат измерения сходится по мере увеличений выборки к значению в 3 балла. Следовательно, границы допустимого изменения этой оценки составят 0,3 балла. Такому условию удовлетворяет объём выборки не менее 15–20 экспериментов.

Сходимость среднего значения важна. Но важна ещё одна оценка: среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренного параметра от его среднего значения, обусловленное многими факторами, действующими на эксперимент. Так же, как и среднее значение, среднеквадратическое отклонение по мере увеличения объёма выборки N стремится к некоторой константе, т.е. наблюдается схождение СКО. Расчётная формула имеет следующий вид:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (10)$$

где x_i – текущее значение измеренного параметра;

$\bar{x}$ – среднее значение измеряемых параметров в объёме выборки.

На Рисунке 5 представлен график сходимости среднего квадратического отклонения по мере увеличения объёма выборки.

Так же, как и в оценке сходимости среднего значения, будем использовать те же границы изменения СКО, т.е. 0,3 балла.

Из анализа этого графика видно, что разброс данных не более, чем на 0,3 балла, обеспечивается при количестве экспериментов не менее 30.

Таким образом, с учётом сходимости среднего и среднего квадратического отклонения для дальнейших исследований установлена выборка в 30 измерений для каждого эксперта.



Рис. 5 – Сходимость среднего квадратического отклонения

Разработка и апробация методики «человеко-ориентированного» интерфейса. Метод теории байесовских сетей

Для оценки влияния информационной среды на качество действий операторов (судоводителей) морских судов в условиях неопределенности с факторами вероятностного характера при восприятии разнородной информации был применен метод байесовских сетей доверия (БСД).

Согласно классической таксономии РВК, гиперпространство обладает следующими характеристиками:

RF – уровень правдоподобия;

EWK – количество информации;

ЕРМ – степень погружения.

Согласно авторской модификации РВК, оператор обладает следующими характеристиками:

TDM – время для принятия решения;

LCL – уровень когнитивной нагрузки;

LIU – уровень понимания ситуации.

В АЧМБ (порт Новороссийск) наиболее резонансной аварией является столкновение судов, которое произошло 31 августа 1986 года. Рассмотрим причины столкновения на пересекающихся курсах п/х «Адмирал Нахимов» с т/х «Петр Васев». Авторы считают, что первопричиной катастрофы являются условия (информационная среда), в которых оказались судоводители судов «Адмирал Нахимов» и «Петр Васев».

Следовательно, для определения наиболее удобной, с точки зрения качества принятия решения, информационной среды нужно рассчитать

вероятность принятия правильного решения (ППР) или вероятность принятия ошибочного решения (ПОР) с учетом характеристик гиперпространства и оператора.

Под сценарием авторы понимают последовательность событий, с некоторой вероятностью вытекающих друг из друга. Оценки экспертов представлены в таблице 5.

Таблица 5

Среда	RF	EWK	ЕРМ	TDM	LIU	LCL	Балл
VE	4	3	9	6	8	5	8,5
AV	5	9	5	7	6	5	8
NV	4,5	5	7	4	5	4	6
MV	4,5	7	9	6	7	5	8
TZ	1	1	1	1	1	1	1
NR	4,5	8	7,5	5	5	6	8
AR	10	10	10	9	9,5	10	10
RE	9	2	9	3	6	9	9
MR	9,5	7	9,5	7	7	7	9,5

Алгоритм действий для анализа и последующего расчета представлен на примере сценария 1, соответствующего событиям, предшествующим столкновению вышеуказанных судов. Последовательность принятия решения с учетом особенностей информационной среды можно проследить по «дереву событий», а вероятности рассчитать с использованием математического аппарата БСД (Рисунок 6).



Рис. 6 – Сценарий 1

Где Kk – коэффициент конкордации.

Коэффициенты конкордации судоводителей, в зависимости от нахождения в соответствующей информационной среде, представлены в таблице 6.

Таблица 6

	VE	AV	NV	MV	TZ	NR	AR	RE	MR
VE	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
AV	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
NV	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
MV	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0
TZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NR	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5
AR	0	0	0	0	0	0,5	1	0,5	0,5
RE	0	0	0	0	0	0,5	0,5	1	0,5
MR	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1

В результате проведенных исследований авторами построена БСД для условий принятия управленческих решений, в которых находились судоводители судов перед столкновением.

Проведены сравнения полных вероятностей ПОР и ППР по вышеуказанным характеристикам информационного гиперпространства для сценария 1 (процесс принятия управленческих решений в условиях перед катастрофой); для сценария 2 (процесс принятия управленческих решений при использовании на судах одинакового набора технических средств судовождения); для сценария 3 (процесс принятия решения в условиях стандартизации информационной среды).

Для кластера с тремя независимыми параметрами для вычисления вероятностей ППР и ПОР судоводителями без учета конкордации была применена формула:

$$P(e_m) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 P(e_m | a_i, b_j, c_k) \cdot P(a_i, b_j, c_k) \quad (11)$$

Расчеты показывают, что полная вероятность события ПОР по сценарию 1 очень велика – 0,47; полная вероятность события ПОР по сценарию 2 меньше, но остается еще большой – 0,27; полная вероятность события ПОР по сценарию 3 является минимальной – 0,06.

Заключение

Таким образом, результаты, полученные авторами с помощью предложенной методики, подтверждают гипотезу о причинно-следственной связи принятия управленческих решений оператором (судоводителем) при нахождении его в условиях той или иной информационной среды (зоны), что позволяет заявить о необходимости рассмотрения вопроса о проведении дальнейших исследований в направлении стандартизации информационной составляющей процесса принятия решений в интеллектуальных транспортных системах.

Литература

1. 2018 Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review» p 48
2. Pinskiy A S 2016 E-Navigation and unmanned navigation (Transport RF vol 4(65)) pp 93-100
3. Carlson D F and Fürsterling A 2019 An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring (HardwareX vol 6) pp 59-78
4. Baldauf M and Benedict K 2011 e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response (WMU Journal of Maritime Affairs) pp 209-226
5. Bayat B and Crasta N 2017 Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques (Current Opinion in Biotechnology vol № 45) pp 76-84
6. Narkiewicz J Świątoń G 2009 Autopilot with adaptive vessel modelling (Annual of navigation vol 15) pp 93-100
7. Barbieri L and Cucinotta F 2020 Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping (Switzerland AG: Springer Nature) pp 422-431
8. Burylin Y V and Kondratyev A I 2021 Automatic pilotage method (Russian Federation: patent 2021612609)
9. Burylin Y 2021 Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1-7
10. Burylin Y A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1-7
11. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24
12. Kondratyev A I and Burylin I V 2021 The method for automatic control of a ship with directional instability (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1-7
13. Astrein V V and Kondratyev S I 2021 Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1-7
14. Astrein V V and Kondratyev S I 2021 Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1-7

15. Tulchinskii V V and Tulchinskii V I 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7

References

1. 2018 Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review» p 48
2. Pinskiy A S 2016 E-Navigation and unmanned navigation (Transport RF vol 4(65)) pp 93–100
3. Carlson D F and Fürsterling A 2019 An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring (HardwareX vol 6) pp 59–78
4. Baldauf M and Benedict K 2011 e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response (WMU Journal of Maritime Affairs) pp 209–226
5. Bayat B and Crasta N 2017 Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques (Current Opinion in Biotechnology vol № 45) pp 76–84
6. Narkiewicz J Świętoń G 2009 Autopilot with adaptive vessel modelling (Annual of navigation vol 15) pp 93–100
7. Barbieri L and Cucinotta F 2020 Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping (Switzerland AG: Springer Nature) pp 422–431
8. Burylin Y V and Kondratiev A I 2021 Automatic pilotage method (Russian Federation: patent 2021612609)
9. Burylin Y 2021 Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7
10. Burylin Y A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7
11. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24
12. Kondratyev A I and Burylin I V 2021 The method for automatic control of a ship with directional instability (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7
13. Astrein V V and Kondratyev S I 2021 Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7
14. Astrein V V and Kondratyev S I 2021 Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7
15. Tulchinskii V V and Tulchinskii V I 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) pp 1–7

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Анатолий Николаевич, доктор технических наук, начальник факультета ЭВТ и СВ, ФГБОУ ВО ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 93, проспект Ленина, Новороссийск, 353918, Российская Федерация. e-mail: an.popov.mga@gmail.com

Anatoly N. Popov, Dr. Sci. (Eng), Head of Faculty of Navigation, Admiral Ushakov maritime State University, 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: an.popov.mga@gmail.com

Бурьлин Ярослав Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, ФГБОУ ВО ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 93, проспект Ленина, Новороссийск, 353918, Российская Федерация. e-mail: y.burylin@gmail.com

Yaroslav V. Burylin, Ph.D. (Eng), Assistant Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov maritime State University, 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: y.burylin@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.03.2024.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.03.2024.
Принята к публикации/accepted for publication 25.03.2024.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.021>

Некоторые проблемные аспекты функционирования системы стандартизации в условиях развития морских технологических комплексов

Заслонов В.В.¹ djdf3d@yandex.ru, Головина А.А.¹ a.a.golovina@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Целью настоящего исследования является изучение вопроса оптимизации циклов объектов морского технологического комплекса. В статье приведены результаты анализа стандартов, на основе которых осуществляется формирование новых проектных изделий в рамках морского технологического комплекса, в который входят и безэкипажные суда, и беспилотные необитаемые аппараты. В работе рассмотрены проблемные аспекты, с которыми сталкиваются разработчики в виду динамичного технологического развития и не соответствия ему действующих регламентов. В работе приведен пример математической модели активно применяемой экспертной системы, адаптированной под морской технологический комплекс, которая, тем не менее, не позволяет однозначно решить описанную проблему. Так же авторами предложен иной математический метод, который способен дать оценку проектным циклам, и на основе которого можно осуществить переосмысление существующих стандартов с учетом современного технологического развития. Указанный метод основан на расчете безотказности системы и сбора статистических данных, которые можно осуществлять, например, при тестировании опытных образцов на стенде или в реальных условиях до внедрения или серийного производства. Таким образом, можно судить, например, об упрощении части документации или необходимости внедрения специального программного обеспечения и закрепления данного факта на регламентирующем уровне.

Ключевые слова: стандартизация, морской технологический комплекс, морские автономные надводные суда, беспилотные необитаемые аппараты.

Для цитирования: Заслонов В.В., Головина А.А. Некоторые проблемные аспекты функционирования системы стандартизации в условиях развития морских технологических комплексов. 2024. № 2 часть 1, С. 181—188. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.021

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.021>

Some problematic aspects of the functioning standardization system in the context of the development of marine technological complexes

Vladimir V. Zaslouov¹ djdf3d@yandex.ru, Anastasiya A. Golovina¹ a.a.golovina@mail.ru¹Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Russian Federation

Abstract. The purpose of this article is to study the issue of optimizing the cycles of offshore technological complex facilities. The article presents the results of the analysis of standards, on the basis of which the formation of new design products is carried out within the framework of the marine technological complex, which includes both unmanned vessels and unmanned vehicles. The paper considers the problematic aspects that developers face in view of the dynamic technological development and the inconsistency of existing regulations with it. The paper gives an example of a mathematical model of an actively used expert system adapted for a marine technological complex, which, however, does not allow unambiguously solving the described problem. The authors also proposed a different mathematical method that is able to evaluate project cycles and on the basis of which it is possible to rethink existing standards, taking into account modern technological development. This method is based on the calculation of the reliability of the system and the collection of statistical data, which can be carried out, for example, when testing prototypes on a stand or in real conditions before implementation or mass production. Thus, it can be concluded, for example, that a part of the documentation has been abolished or that it is necessary to introduce special software and fix this fact at the regulatory level.

Keywords: standardization, marine technological complex, marine autonomous surface vessels, unmanned vehicles.

For citation: Vladimir V. Zaslouov, Anastasiya A. Golovina, Some problematic aspects of the functioning of the standardization system in the context of the development of marine technological complexes, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 181—188. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.021

Введение

Морская индустрия стремится использовать передовые технологии во многих аспектах, что оказывает влияние на судоходную отрасль, заставляя ее динамично меняться [9]. Морской транспортный комплекс Российской Федерации функционирует в условиях реализации целей и задач

посредством различного уровня разработок и внедрений в рамках национальной политики, которая определена, в том числе, Морской доктриной РФ (утверждена Указом Президента РФ от 31 июля 2022 №512), согласно которой развитие морской деятельности и морского потенциала является одним из решающих условий устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации в

XXI веке, что подтверждает актуальность и практическую ценность проведения исследования проблемных вопросов нормативного регулирования в рассматриваемой сфере.

По мнению исследователей в условиях современного развития морского транспортного комплекса, на которое оказывают влияние, в том числе, развитие информационных технологий, с целью повышения эффективности его функционирования важное значение придается системе управления и ее актуальности, соответствии требованиям новых условий ведения бизнеса [1]. Справедливо согласиться с указанной позицией и сделать вывод о том, что совершенствование системы менеджмента и стандартов на предприятии, как сложной экономической и социальной системы, является одним из ключевых путей стабилизации экономики в целом и разработки морских технологических комплексов в отдельности.

Стандарты в самом общем виде, являясь обязательными только в установленных законом случаях, включают в себя правила описания исходной информации, способов и методов выполнения работ, устанавливая правила контроля технологических процессов, требования к оформлению их результатов, а также регламентируют содержание технологических и эксплуатационных документов на изделия. Кроме того, они определяют организационную структуру коллектива, обеспечивают распределение и планирование заданий, контроль за ходом создания морского технологического комплекса.

Для соответствия современным реалиям стандарты должны выступать инструментом реализации концепции постоянного совершенствования соответствующих отраслей: внедряя передовые методики, предприятия получают практические результаты улучшения и критерии оценок достижения высоких уровней качества. Данный тезис касается, в том числе, всех направлений морского транспорта, в особенности тех, что относятся к наиболее перспективным: автономное судоходство [7], интернет вещей [8] и др. Особый интерес в этой связи вызывают морские автономные надводные суда (далее – МАНС), в том числе полностью безэкипажные, а также беспилотные необитаемые аппараты (далее – БНА), что подтверждается проводимыми научными исследованиями [3] [6].

В последнее десятилетие исследование вопросов разработки и внедрения МАНС различного класса и назначений ведется множеством государств особенно активно [12] [13], что говорит о повсеместной заинтересованности в развитии данной отрасли. Однако значительное число опубликованных по данному направлению исследований посвящено вопросам проектирования и создания автономных судов, особенностям обеспечения их живучести, достижения безаварийной работы и безопасности эксплуатации, вопросам управления, планирования движения и так далее. Также исследованы аспекты перспективы развития области автономного морского судоходства с учетом мнений заинтересованных участников морской транспортной отрасли [14].

Вместе с тем необходимо понимать, что эффективное внедрение концепции автономного

судовождения не представляется возможным без соответствующих исследований правового регулирования отрасли, в том числе, в части изучения действующих стандартов, которые должны соответствовать текущему уровню развития технологий. И если правовой статус МАНС, лиц, управляющих им, и прочие общие вопросы правового регулирования в последнее время были исследованы [15] [16] [17], сфера стандартизации научными работами практически не охвачена. Поэтому представляется, что настоящее исследование имеет как теоретическую, так и практическую значимость, позволяя использовать предлагаемый в работе метод для совершенствования системы стандартизации.

Однако для достижения эффективной, безаварийной работы указанных технических единиц [4] требуется детальное изучение соответствующих действующих стандартов на предмет необходимости их совершенствования для соответствия текущему уровню развития технологий. В этой связи можно предположить, что использование математических методов позволит выявить приоритетные направления для совершенствования существующих стандартов.

Наличие преимуществ в виде комплекса факторов, обеспечивающие развитие рассматриваемого комплекса, может быть определено на основе использования методов экспертных оценок – оценочной системы, которая выявляет приоритетные направления, в случае необходимости каких-либо переменных на каком-либо этапе, способ, очевидно, не эффективен. Таким образом, в рамках настоящего исследования представляется необходимым рассмотреть применение данного метода на примере разработки БНА или МАНС, как части МТК.

Целью настоящего исследования является изучение наиболее благоприятного способа формирования изделия, используя математическое моделирование, на основании которого будут реализованы этапы создания изделия, например, разработка концепции технической единицы, ее виртуальные имитации, создание рабочей модели. Сформированная в рамках исследования методика обеспечит искомое описание методики конкретных этапов для последующего закрепления ее в стандартах, например, разработки изделия по указанной алгоритмизации. С учетом ряда сложностей, с которыми сталкиваются разработчики, пример, который будет получен, может лечь в основу решения иных проблем, которые не рассматриваются в данном исследовании в рамках решаемых задач, для оптимизации иных этапов и направлений работы при проектировании, тестировании, внедрении и др.

Постановка проблемы

В стандартах, регламентирующих алгоритм создания морских технологических комплексов (далее – МТК), должен обобщаться опыт и результаты исследований множества и отдельных специалистов, и лабораторий и рекомендоваться наиболее эффективные современные методы. Также подобные стандарты должны представлять собой описание этапов, операций, и регламентировать ведение работ от подготовки технического задания

до внедрения опытных образцов и окончания эксплуатации разными способами. В этой связи содержание указанных стандартов должно соответствовать современному уровню развития технологий [2]. Указанная задача является достаточно сложной, однако ее решение будет способствовать достижению наибольшей эффективности функционирования соответствующего комплекса, а также обеспечения высокого качества отдельных его элементов. По этой причине отставание содержания стандартов, технических регламентов от современного уровня развития технологий представляет собой серьезную проблему.

Анализ соответствующих норм свидетельствует о том, что некоторые требования в части создания и развития составляющих МТК в условиях современных тенденций отражены недостаточно полно, а отдельные регламенты устарели с точки зрения современных прикладных программ высокого качества в системах управления и обработки данных с различной архитектурой, которые в свою очередь постоянно совершенствуются. Проблемы возникают также и в связи с неоднозначностью толкования некоторых положений соответствующих актов. Например, ГОСТ 2.302-68 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Масштабы» обязателен к применению только при выполнении работ по Государственному оборонному заказу, либо если соответствующее условие предусмотрено договором. Поэтому организации вправе принимать решения об установлении собственных рядов предпочтительных масштабов в конструкторской документации, либо не ограничивать масштабы. П.3.4 рассматриваемого стандарта закрепляет положение о том, что масштабы изображений на чертежах, выполняемых на графических устройствах, следует выбирать из ряда по ГОСТ 2.302. В то же время примечанием к указанному пункту установлено, что допускается применение масштабов уменьшения 1:n и увеличение 1:n, где n – рационально число. Таким образом, указанные положения создают затруднения для исполнителя конструкторской документации неоднозначностью своего толкования.

Представляется, что в условиях современного уровня технологического развития наиболее эффективным было бы использование стандартов, которые бы описывали не только применение стандартных ресурсов (человеческий ресурс, финансовая составляющая, сырье, трудозатраты, время и др.), но и использование различных компьютерных комплексов с целью упрощения процесса формирования и эксплуатации единиц МТК. Применение подобных стандартов также имеет экономическое значение, предположительно позволяя экономить на экспериментах, в то время как разработка методов снижения затрат, связанных с проектированием и созданием объектов МТК, является актуальной задачей [5]. Здесь также можно отметить, что создание производственного программного обеспечения, заменяющего некоторые программы, позволит не только экономить ресурсы, но и более точно определять результат местной разработки, под которую можно создавать компьютерные комплексы.

Таким образом несовершенство функционирования системы стандартизации создает затруднения для участников соответствующих направлений деятельности, что способно негативно отразиться на характеристиках создаваемых или модернизируемых комплексов.

Обсуждение результатов

Главный способ модернизации системы – внедрение математических моделей в структуру формирования и последующей эксплуатации (оценки циклов жизни изделия). Для их эффективного применения необходима разработка стандартного алгоритма по расчету основных параметров изделия [10].

Для применения указанного выше метода необходимо определить показатели для оценивания, для чего введем следующие 10 факторы:

- Новизна, анализ;
- Степень автоматизации;
- Сложность исполнения;
- Степень применения различного ПО;
- Сложность, степень симуляции при различных испытаниях (в частности, на стенде, бассейне, аэродинамической трубе и др.);
- Степень внедрения цифровых документов, КД, РКД и др.
- Использование отечественных комплектующих;
- Унифицированность;
- Экологичность;
- Окупаемость.

По каждому установленному фактору, которые приведены для примера ранее, n получены «экспертные» оценки r в виде среднего значения от общего числа полученных ответов. Указанные факторы были расположены в определенном порядке, например, приоритетности от i до a . Конвертируем значение r в сумму рангов s .

В рассматриваемом примере описывающий процесс создания элемента МАНС в рамках МТК, например, будет в виде i -а – от 1 до 10. Сумма рангов по предложенным характеризующим факторам МТК не будет больше числа, равное произведению $b \times c$, при $b = 10$ и $c = 10$ (с учетом исходных данных) экспертов, прошедших опрос. s факторов определяется как $s=(1-p), bc=(1-p)100$.

W определяется с помощью математических методов статистических расчетов в рамках экспертных оценок:

$$\sum_1^{10} \left(s - \frac{1}{10} \sum_1^{10} s \right)^2 = S; S_{max} = 0.5b^2c(c^2 - 1); W = \frac{6S}{S_{max}}. \quad (1)$$

Однако в отечественном МТК такая экспертиза не объективна и ее проведение осложнено, и отражает субъективную сторону решения проблемы без четкого решения задач – опираясь на мнение различных специалистов с индивидуальными подходами и др.

Более объективным методом определения может быть сбор статистических данных на основе, например, расчета отказов системы при ее тестировании.

В качестве основных показателей надежности в период любых циклов жизнедеятельности изделия

или этапов проектирования определяем $\omega(t)$, который является параметром искомого потока отказов того или иного объекта математического описания изделия, например, узла (устройства или конструкции) для швартовки МАНС, в период времени, где $P(t)$ - вероятность отказоустойчивости описываемого устройства швартовки в период $(0, t)$, учитывая что в последующей алгоритмизации $P(t_1, t_2)$ принимаем, как безотказность работы описываемой конструкции МАНС в период времени.

Отказоустойчивый поток в установленный интервал времени определяется как равенство

$$\tilde{P}_n(t_1, t_2) = \frac{1}{n!} [(t_2 - t_1)\omega_{cp}]^n \exp[-\omega_{cp}(t_2 - t_1)], \omega_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt, \quad (2)$$

где при $n = 0$ получим алгоритм для вероятности безотказной работы узла МАНС в период времени.

$$\tilde{P}_0(t_1, t_2) = \tilde{P}(t_1, t_2) = \exp[-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt]. \quad (3)$$

Автоматизированный швартовный узел МАНС, в который входит комплект узлов (узел, в зависимости от расчетов) введенных в эксплуатацию или тестирование на стенде, например, и k -элементов которые находятся в запасе, то отказ конструкции определяем:

$$\tilde{m}_{tc} = \frac{m_r}{k+1} [(1 + \frac{m_t}{m_r})^{k+1} - 1], \quad (4)$$

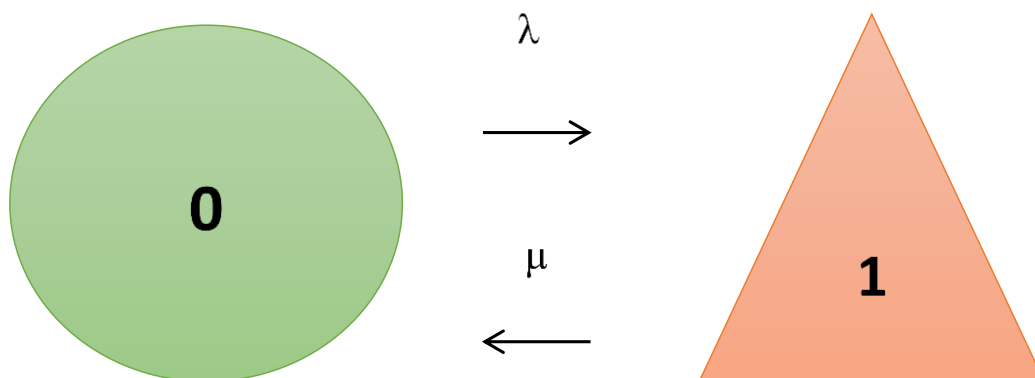


Рис.1 – Схема состояний системы МАНС, где «0» и «1» - рассматриваемые состояния (работает/не работает), «λ» и «μ» - интенсивность переходов между блоками по кратчайшему пути

В случае распределения переменных, согласно схеме на рисунке 1 получаем группу дифференциальных уравнений:

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); P'_1(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \quad (7)$$

Если $t = 0$, конструкция швартовного устройства находилась в рабочем состоянии, тогда $P_0(0) = 1$. Если $P_1(0) = 0$ то получим:

$$K_{\Gamma}(t) = P_0(t) = \mu \mu + \lambda \mu + \lambda \exp[-(\mu + \lambda)t]; K_{\Pi}(t) = P_1(t) = \lambda \mu + \lambda - \lambda \mu + \lambda \exp[-(\mu + \lambda)t]. \quad (8)$$

Если $t = 0$, конструкция швартовного устройства находилась в процессе обслуживания или ремонта, тогда $P_0(0) = 0$, $P_1(0) = 1$. Опираясь на вышеизложенное, получим:

где m_t и m_r — усредненный интервал времени безотказной работы и ее восстановления.

В том случае, если $(1 + m_t/m_r)^{(k+1)} \gg 1$, то теория распределения периодов «от отказа до отказа» будет приближаться к показательному значению и таким образом значение безотказности в период времени определяется:

$$\tilde{P}_k(t_i) \approx \exp[-\frac{t_i}{\tilde{m}_{tc}}]. \quad (5)$$

В случае структурирования процесса некоторые блоки линия связи проходит неоднократно, но при этом, учитывается лишь однажды, с учетом интенсивности переходов. Вероятность безотказности системы определяем как равенство:

$$P_k = \frac{\Delta_k}{\sum_{j=0}^m \Delta_j}, \quad (6)$$

где Δ_k , Δ_j — произведения интенсивностей переходов между блоками системы по кратчайшему пути; m — значение, описывающее статус узла МАНС (Рисунок 1).

Часть описываемого комплекса, который принято считать «нерезервированной» принимаем работоспособной (0) или неработоспособной (1). Вероятность введенных стадий выводим через переменные $P_0(t)$ и $P_1(t)$ соответственно. В случае необходимости осуществляется ремонт или техническое обслуживание.

$$\left. \begin{aligned} K_{\Gamma}(t) = P_0(t) &= \frac{\mu}{\mu + \lambda} - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp[-(\mu + \lambda)t]; \\ K_{\Pi}(t) = P_1(t) &= \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp[-(\mu + \lambda)t]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Достаточно часто встречается, что устройства находятся в длительной эксплуатации, это может вызвано быть рядом факторов, например, качеством исполнения, соблюдением регламента эксплуатации и др., тогда период времени стремится в алгоритме к бесконечности ($t \rightarrow \infty$), тогда коэффициенты готовности устройства или простоя, определяются системой:

$$\left. \begin{aligned} K_{\Gamma} &= \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \\ K_{\Pi} &= \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты не зависят от исходных значений. Так как $\lambda=1/m_t$, $\mu=1/m_r$, получаем:

$$K_I = \frac{m_t}{m_t + m_r}, K_{II} = \frac{m_r}{m_t + m_r}, \quad (11)$$

таким образом получаем, что коэффициенты характеризуют одни узлы, как «рабочие», а другие «требующие ремонт» или «в ремонте».

При обстоятельствах, когда период времени $t \leq m \ln K_I$, тогда работоспособное состояние, в нашем случае, швартовного узла МАНС, будет равно по значению числу безотказной работы в установленный период времени. Если $K_I > 0,9$, то:

$$\Delta K_I(t) \approx (1 - K_I) K_I^{\frac{K_I}{1-K_I}} 100\%. \quad (12)$$

Таким образом, системы для определения коэффициентов простоя и работоспособности системы МАНС, можно определять по приведённому алгоритму. В случае перехода устройства из состояния в блоке «1» в состояние блока «0» интенсивность перехода имеет значение μ , а если наоборот, то $1=\lambda$, значит:

$$P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \quad (13)$$

В тех случаях, когда осуществляется хаотичное (произвольное) распределение иском значений, например, простоя и восстановления, используем интегральное уравнение вида:

$$P_0(t) + \lambda \int_0^t P_0(t-x)[1-G(x)]dx = 1 \quad (14)$$

Необходимо понимать, что определить функцию при $K_I(t)=P_0(t)$ возможно практически всегда в любой

период времени, однако при определённых ситуациях справедливо равенство:

$$K_I(t) = \sum_{j=1}^n P_j(t), \quad (15)$$

где n — количество состояний; $P_j(t)$ — вероятность j -го рассматриваемого состояния.

И в заключении алгоритмизации процесса, необходимо указать, что при условии работоспособных состояний, превышающих неработоспособные, необходимо определять коэффициент следующим равенством:

$$K_{II}(t) = \sum_{i=1}^{m+1+n} P_i(t), \quad (16)$$

где $P_i(t)$ — вероятность i -го не работоспособного состояния узла МАНС; $m+1$ — общее число состояний швартовного устройства, в данном случае.

И на основании полученной базы алгоритмизации безотказности системы, осуществляется расчет и иных аналогичных случаев. Система МАНС может состоять из равнонадежных и резервных узлов МАНС:

1. 0 — все составляющие узла МАНС в рабочем состоянии и/или эксплуатируются;
2. 1 — один узел МАНС находится в нерабочем состоянии или состоянии технического обслуживания;
3. j — неработоспособное состояние системы МАНС;
4. $k+1$ — элементы системы МАНС находятся в неработоспособном состоянии.

На основании описанного способа была разработана конструкция для обеспечения автоматической швартовки МАНС с последующим макетными испытаниями и оформления патента для дальнейшего внедрения (см. рисунок 2) [11].

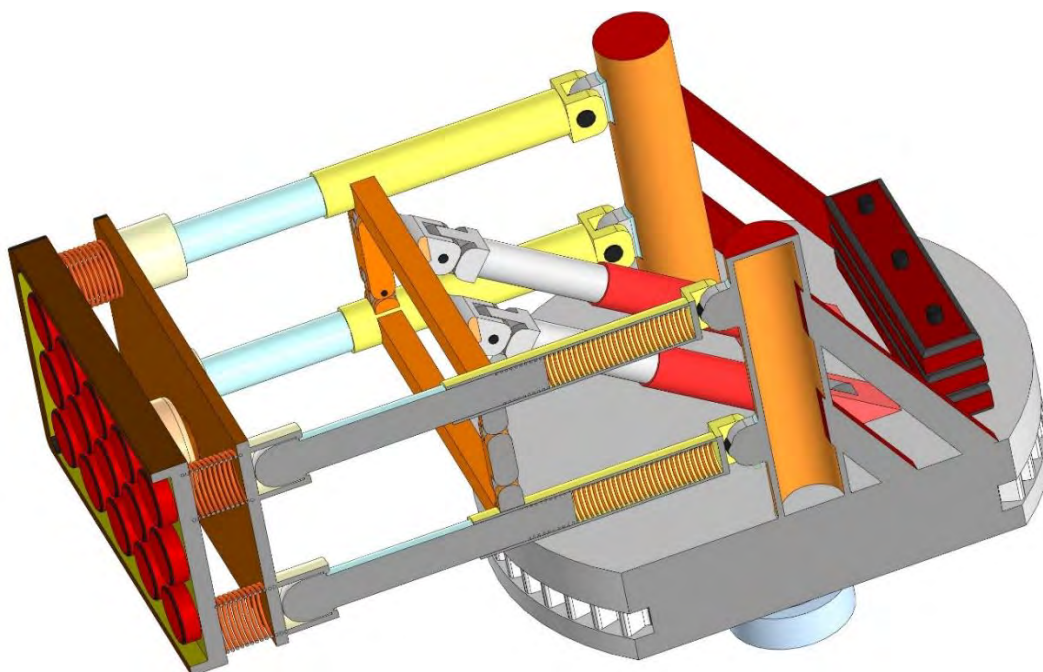


Рис. 2 – Описываемый узел швартовки – поворотный буксирный швартовный механизм

Заключение

Путем описанной алгоритмизации определяется период работоспособности, простоя, безотказности и

др. при определённых коэффициентах, в зависимости от ситуации в рассматриваемый период времени. Подобная математическая система решит проблему стандартизации технологических средств,

так как еще на этапе тестирования, например, на стенде, возникает возможность прогнозирования работоспособности циклов, что дает возможность дать объективную оценку изделию.

Так, например, получаем схему взаимосвязей блоков (см. рисунок 3) на основании полученного алгоритма, которые характеризуют рассматриваемый узел МАНС, что детально позволяет оценить циклы эксплуатации, в частности периоды простоя, что очень негативно сказывается при осуществлении морских операций по перевалке грузов.

По аналогии, такая алгоритмизация применима ко всем системам, начиная с портовой инфраструктуры, заканчивая судном, как системой, так как описывает именно системы из блоков, что и позволяет рассматривать их и отдельно, и вместе.

На основании получаемых данных по рассмотренной математической модели возможна

объективная оценка эксплуатации или испытаний, которая может лечь в основу изменений действующих стандартов (например, получения и использования изделия с применением того или иного программного обеспечения, циклов эксплуатации, методик разработки документации и др).

Применение иных математических методов оценки для иных этапов эксплуатации изделия позволит оценить и модернизировать применяемые стандарты более объективно и детально.

Кроме того, рассмотренная в настоящей работе оценочная система позволит точно указать на применение промежуточного программного обеспечения, необходимого для диагностики, мониторинга или проектирования узлов, конструкций.

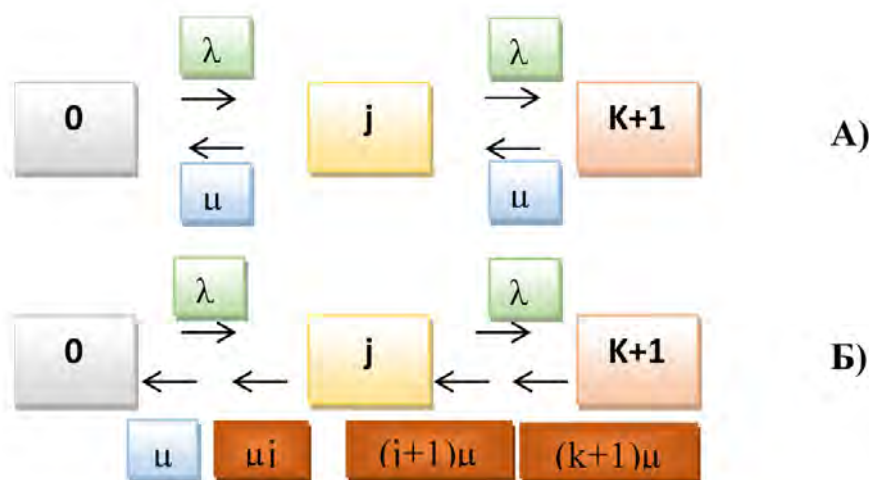


Рис. 3 – Описание безотказности простоя системы с помощью блоков состояния

Например, таким программным обеспечением может быть система мониторинга усталостного разрушения при эксплуатации автоматического швартовного устройства МАНС или любых иных узлов систем МТК (см. рисунок 4) ранее разработанная для целей научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судовождения» при разработке инфраструктуры МАНС, которое при учете ряда значений циклов узла или изделия и

напряжения, осуществляет прогноз состояния конструкции при эксплуатации на определённом интервале времени.

В рамках дальнейших исследований, на основе текущего результата, представляется возможным исследовать вопросы оптимизации этапов разработки расчётной конструкторской документации и внедрения технических единиц с дальнейшим производством на современном этапе.

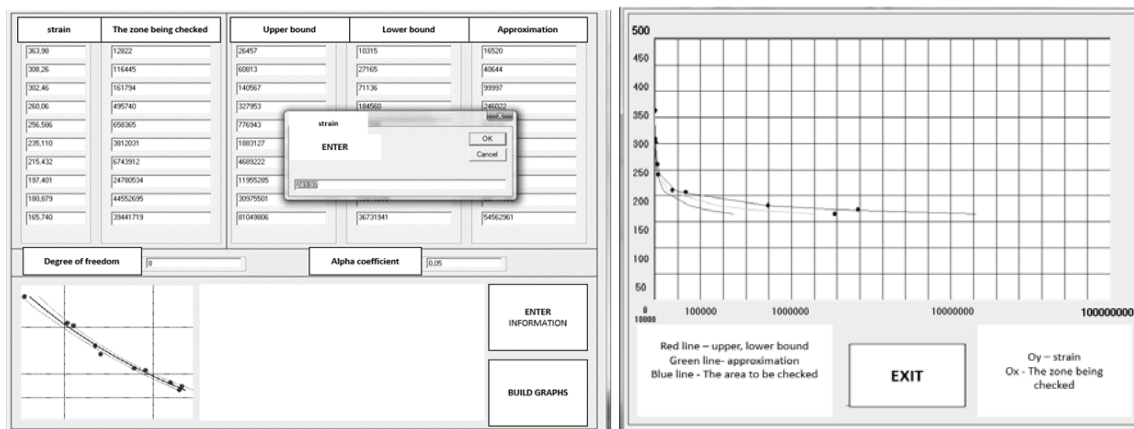


Рис. 4 – Разработанное программное обеспечения для осуществления расчета усталостного разрушения

Литература

1. Рязанов, В. Ю. Анализ нормативной базы по подтверждению соответствия требованиям функциональной безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. *Автоматика на транспорте*. 2020. Т. 6. № 4. С. 435-465. DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-4-435-465.
2. М. В. Ботнарчук, М. И. Классовская. Определение значимости индикаторов достижения целей при построении системы управления предприятий транспортной отрасли в цифровой экономике. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 2-4(52). С. 146-152. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.084.
3. 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.
4. Епихин, А. И. 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.
5. Osmukha, S., Zelenkov, G. (2022). Asymptotic of Calculation of Hydro-Mechanical Fields of a Marine Mobile Object by the Finite Volume Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoylenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 424. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_21
6. de Vos J, Hekkenberg R G, Valdez Banda O.A. (2021) The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 210. 107558
7. Kooij C, Loonstijn M, Hekkenberg R, Visser K. (2018). Towards autonomous shipping: Operational challenges of unmanned short sea cargo vessels. *Marine Design XIII*. 2: 871–880
8. M V Botnaryuk and S A Kalinina 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2061 012140
9. Hadi Ghaderi (2019) Autonomous technologies in short sea shipping: trends, feasibility and implications, *Transport Reviews*, 39:1, 152-173, DOI: 10.1080/01441647.2018.1502834
10. V. V. Zaslouov, A. A. Golovina, A. N. Popov (2019) 2020 Creating a Crewless Ship in the Framework of the Technological Paradigm of the Russian Federation *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration V1* (115) pp 468-474
11. Патент на полезную модель № 215135 U1 Российская Федерация, МПК В63В 21/02. поворотный буксирный швартовный механизм : № 2022119532 : заявл. 15.07.2022 : опубл. 30.11.2022 / В. Г. Сенченко, А. Б. Крючков, В. В. Заслонов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова"
12. Ziaul Haque Munim, Hercules Haralambides. (2022) Advances in maritime autonomous surface ships (MASS) in merchant shipping. *Maritime Economics & Logistics*. 24(2). DOI:10.1057/s41278-022-00232-y
13. Xue Li. (2022) Autonomous ships: A study of critical success factors. *Maritime Economics & Logistics*. 24(6). DOI:10.1057/s41278-022-00212-2
14. Theotokatos, G., Dantas, J.L.D., Polychronidi, G. et al. (2023) Autonomous shipping — an analysis of the maritime stakeholder perspectives. *WMU J Marit Affairs*. 22, pp 5–35 <https://doi.org/10.1007/s13437-022-00290-2>
15. Kooij C, Loonstijn M, Hekkenberg R, Visser K. Towards autonomous shipping: Operational challenges of unmanned short sea cargo vessels. *Marine Design XIII*. – 2018. – 2. – pp 871–880
16. Ключев В.В. Правовое регулирование использования автономных судов // Транспорт Российской Федерации. *Журнал о науке, практике, экономике*. 2018. №5 (78). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovoe-regulirovanie-ispolzovaniya-avtonomnyh-sudov> (дата обращения: 20.12.2023).
17. Golovina, A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web of Conferences*. 2022. Vol. 134. P. 00114. DOI 10.1051/shsconf/202213400114. – EDN WPEUCZ.

References

1. Ryazanov, V. YU. Analiz normativnoy bazy po podtverzhdeniyu sootvetstviya trebovaniyam funktsional'noy bezopasnosti mikroprocessornyykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki. [Analysis of the regulatory framework to confirm compliance with the requirements of functional safety of microprocessor systems of railway automation]. *Avtomatika na transporte*. 2020. T. 6. № 4. S. 435-465. DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-4-435-465.
2. M. V. Botnaryuk, M. I. Klassovskaya. Opredelenie znachimosti indikatorov dostizheniya celej pri postroenii sistemy upravleniya predpriyatij transportnoj otrasli v cifrovoj ekonomike. [Determining the significance of indicators for achieving goals when building a management system for enterprises in the transport industry in the digital economy]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2021. № 2-4(52). S. 146-152. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.084.
3. Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Heckert, Marina A. Modina. Analiz bezopasnosti bezekipaznykh sudov na osnove struktury modeli riska s ispol'zovaniem seti bajesa. [Analysis of the safety of unmanned vessels based on the structure of the Bayes network-based risk model]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2021. № 2 part 4. S. 38—46.
4. Aleksey I. Epikhin, Marina A. Modina. Problemy vnedrenia bezekipaznykh sydov na osnove statisticheskikh issledovaniy avariynikh [Problems of implementation of unmanned ships based on statistical studies of accidents and losses of ships]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2021. № 3-1(53). S. 77-82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010.
5. Osmukha, S., Zelenkov, G. (2022). Asymptotic of Calculation of Hydro-Mechanical Fields of a Marine Mobile Object by the Finite Volume Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoylenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 424. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_21

6. de Vos J, Hekkenberg R G, Valdez Banda O.A. (2021) The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 210. 107558
7. Kooij C, Loonstijn M, Hekkenberg R, Visser K. (2018). Towards autonomous shipping: Operational challenges of unmanned short sea cargo vessels. *Marine Design XIII*. 2: 871–880
8. M V Botnaryuk and S A Kalinina 2021 J. Phys.: *Conf. Ser.* 2061 012140
9. Hadi Ghaderi (2019) Autonomous technologies in short sea shipping: trends, feasibility and implications, *Transport Reviews*, 39:1, 152-173, DOI: 10.1080/01441647.2018.1502834
10. V. V. Zaslonov, A. A. Golovina, A. N. Popov (2019) 2020 Creating a Crewless Ship in the Framework of the Technological Paradigm of the Russian Federation *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration V1* (115) pp 468-474
11. Patent RF № 215135 U1, МПК В63В 21/02. Povorotnyy buksirnyy shvartovnyy mekhanizm [Swivel towing mooring mechanism]: № 2022119532 : declared. 15.07.2022 : published 30.11.2022 / V. G. Senchenko, A. B. Kryuchkov, V. V. Zaslonov; declarer Admiral Ushakov State Maritime University
12. Ziaul Haque Munim, Hercules Haralambides. (2022) Advances in maritime autonomous surface ships (MASS) in merchant shipping. *Maritime Economics & Logistics*. 24(2). DOI:10.1057/s41278-022-00232-y
13. Xue Li. (2022) Autonomous ships: A study of critical success factors. *Maritime Economics & Logistics*. 24(6). DOI:10.1057/s41278-022-00212-2
14. Theotokatos, G., Dantas, J.L.D., Polychronidi, G. et al. (2023) Autonomous shipping — an analysis of the maritime stakeholder perspectives. *WMU J Marit Affairs*. 22, pp 5–35 <https://doi.org/10.1007/s13437-022-00290-2>
15. Kooij C, Loonstijn M, Hekkenberg R, Visser K. Towards autonomous shipping: Operational challenges of unmanned short sea cargo vessels. *Marine Design XIII*. 2018. 2. pp 871–880
16. Klyuev V.V. Legal regulation of the use of autonomous ships. *Transport of the Russian Federation. Magazine about science, practice, economics*. [Pravovoe regulirovanie ispol'zovaniya avtonomnyh sudov. Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike.] 2018. №5 (78). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovoe-regulirovanie-ispolzovaniya-avtonomnyh-sudov> (date of access - 20.12.2023).
17. Golovina, A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web of Conferences*. 2022. Vol. 134. P. 00114. – DOI 10.1051/shsconf/202213400114. – EDN WPEUCZ.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Заслонов Владимир Валерьевич, мл. научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судовождения» ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адм. Ф.Ф. Ушакова», Россия, г.Новороссийск, пр.Ленина, д.93, e-mail: djdf3d@yandex.ru

Vladimir V. Zaslonov, researcher of the research laboratory "Automation of Navigation», Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, e-mail: djdf3d@yandex.ru

Головина Анастасия Алексеевна, ст. преподаватель кафедры «Публичное право» ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адм. Ф.Ф. Ушакова», Россия, г. Новороссийск, пр. Ленина, д.93, e-mail: a.a.golovina@mail.ru

Anastasiya A. Golovina, Senior Lecturer of department «Public law», Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, e-mail: a.a.golovina@mail.r

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 21.03.2024

Научная статья

УДК 629.127/004

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.022>

Системный анализ достижимости параметров динамики телеуправляемых аппаратов по показателям статической устойчивости и технической производительности

Данцевич И.М.¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, Лютикова М.Н.¹ mnlyutikova@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе приведены исследования показателей эффективности телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) при синтезе оптимальной системы управления по параметрам статической устойчивости и рабочей производительности. Анализ показателей проводился по методу минимума среднеквадратического значения ошибки управления и альтернативного ему метода динамического программирования (принцип максимума быстрогодействия параметра). Статическая устойчивость достигается выбором компоновки лёгкого и прочного корпуса, выбором конфигурации системы обеспечения нейтральной плавучести, но в то же время повышает общую инертность динамики аппарата и ухудшает показатель технической производительности. Управление ТНПА обеспечивается постоянной динамикой движительно-рулевого комплекса в прямом и обратном направлении и комбинацией переключения направления тяги. Лучшие условия повышения технической производительности обеспечивается применением пропорционально-интегральным дифференциальным регулятором (ПИД) в котором учёт показателей статической устойчивости реализуется идентификацией динамики ТНПА. Оптимальным с точки зрения величины отношения скорости развиваемой ДРК к возможной является величина 20дБ/дек. Реализация оптимального управления требует значительного объёма статистик коэффициентов сопротивления движению, в зависимости от направления движения, пространственного положения ТНПА и калибровочных параметров ДРК. В этом аспекте лучшие результаты получаются при исследовании моделей в аэротрубном эксперименте.

Ключевые слова: движительно рулевой комплекс (ДРК), телеуправляемый необитаемый аппарат, телеуправляемый необитаемый комплекс, статическая устойчивость, энерговооружённость, удельная мощность, удельная производительность, оптимальное управление, пропорционально-интегральный дифференциальный регулятор (ПИД)

Для цитирования: Данцевич И.М., Лютикова М.Н. Системный анализ достижимости параметров динамики телеуправляемых аппаратов по показателям статической устойчивости и технической производительности. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 189—197. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.022

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.022>

System analysis of the achievability of the parameters of the dynamics of remote-controlled vehicle in terms of static stability and technical performance

Igor M. Dantsevich¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The paper presents studies of the performance indicators of remote-operations vehicles (ROVs) in the synthesis of an optimal control system according to the parameters of static stability and operational productivity. The analysis of the indicators was carried out using the method of the minimum RMS value of the control error and an alternative method of dynamic programming (the principle of maximum performance of the parameter). Static stability is achieved by choosing the layout of a lightweight and durable hull, choosing the configuration of a neutral buoyancy system, but at the same time increases the overall inertia of the dynamics of the device and worsens the indicator of technical performance. The control of the ROVs is provided by the constant dynamics of the propulsion and steering complex in the forward and reverse directions and a combination of switching the thrust direction. The best conditions for increasing technical productivity are provided by the use of a proportional integral differential regulator (PID) in which the consideration of static stability indicators is realized by identifying the dynamics of ROVs. The optimal value from the point of view of the ratio of the speed of the developed PSC to the possible one is 20dB/dec. The implementation of optimal control requires a significant number of statistics on the coefficients of resistance to movement, depending on the direction of movement, the spatial position of the ROVs and the calibration parameters of the PSC. In this aspect, the best results are obtained when studying models in an aero tube experiment.

Keywords: propulsion and steering complex (PSC), remotely operated underwater vehicle (ROV), Underwater remote operations complex (UROC), static stability, power - to - weight ratio, specific power, specific performance, optimal management, proportional integral differential regulator (PID).

For citation: Igor M. Dantsevich, Marina N. Lyutikova System analysis of the achievability of the parameters of the dynamics of remote-controlled vehicle in terms of static stability and technical performance. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 189—197. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.022

Введение

Телеуправляемые аппараты, используемые для производства подводно-технических и поисково-спасательных работ, имеют нейтральную плавучесть, и применение рабочих инструментов требует активной компенсации динамики и позиции аппарата.

В сложившейся научной практике, рассматривается формирование вектора тяги в различных направлениях системой движительно-рулевого комплекса. Причём расстояния, на котором возможны активная компенсация переключением системы ДРК ограничены дистанцией видимости с рабочих камер, обычно 3-5 метра, в отдельных районах мирового океана до 7 метров.

В работах [1-2] авторы рассматривали показатели эффективности телеуправляемых необитаемых комплексов:

– показатель энергоэффективности

$$E_{DW} = \frac{S_n}{DW} \text{ [кВт/тн.]} \quad (1)$$

где S_n – мощность всех потребителей телеуправляемого комплекса (кВт), DW – дедвейт (тн.);

– удельная мощность

$$N_{уд} = \frac{S_n}{m \cdot v} \text{ [кВт/ (тн. уз)]} \quad (2)$$

где m – вес ТНПК [тн.]; v – скорость [уз.];

– техническая производительность

$$P_{тп} = \frac{DW \cdot v}{N_{ДРК}} \text{ [тн. м. кВт/с]} \quad (3)$$

где $N_{ДРК}$ – мощность движительно-рулевого комплекса;

– техническая производительность по запасу плавучести

$$P_{зп} = \frac{Q \cdot v}{N_{ДРК}} \text{ [тн. м. кВт/с]} \quad (4)$$

где Q – запас плавучести ТНПК.

Для параметра технической производительности:

$$P_{тп} = \frac{DW \cdot v \cdot k_\mu}{N_{ДРК}} \text{ [тн. м. кВт/с]} \quad (5)$$

определим параметр μ характеризующий «крутизну» характеристик упоров движителей:

$$\mu = \frac{\dot{v}_i}{v_{max}} \quad (6)$$

где $\dot{v}_i$ – текущее значение скорости ТНПА в зависимости от времени; v_{max} – максимально возможная скорость, развиваемая ТНПА в маршевом, лаговом или вертикальном направлении.

Иначе говоря:

$$\frac{dk_\mu(t)}{dt} = e^\mu, \text{ или } k_\mu(t) = \mu e^{\mu-1} \quad (7)$$

Классическое решение [3-4] для адаптивных регуляторов динамики в трёх плоскостях, представляется как математическое ожидание параметра в зависимости от наблюдаемой динамики (идентификации системы):

$$[\mu_i \mu_i^T] = \begin{bmatrix} \mu_{0i}^2 & \mu_{0i}\mu_{1i} & \mu_{0i}\mu_{2i} & \dots & \mu_{0i}\mu_{ki} \\ \mu_{1i}\mu_{0i} & \mu_{1i}^2 & \mu_{1i}\mu_{2i} & \dots & \mu_{1i}\mu_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{ki}\mu_{0i} & \mu_{ki}\mu_{1i} & \mu_{ki}\mu_{2i} & \dots & \mu_{ki}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

учитывая параметры решающих обратных связей:

$$M[\mu_i X_i^T] = \begin{bmatrix} \mu_{0i}^2 & \mu_{0i}x_{1i} & \mu_{0i}x_{2i} & \dots & \mu_{0i}x_{ki} \\ \mu_{1i}x_{0i} & \mu_{1i}^2 & \mu_{1i}x_{2i} & \dots & \mu_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{ki}x_{0i} & \mu_{ki}x_{1i} & \mu_{ki}x_{2i} & \dots & \mu_{ki}x_{ki} \end{bmatrix} \quad (9)$$

идентификация системы по взаимокорреляционным связям сигнала управления и ошибки управления:

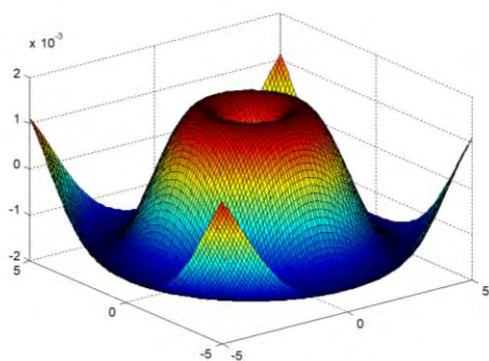
$$R = M[\mu_i X_i] = M[\mu_i x_{0i} \mu_i x_{1i} \dots \mu_i x_{ki}]^T \quad (10)$$

вектор – столбец (10) это взаимокорреляционная функция задаваемых параметров движения μ и параметры решающих функций в обратной связи регулятора.

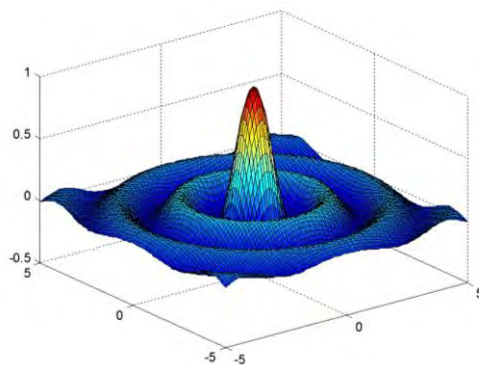
Тогда норма ошибки управления рабочей функции:

$$E[\varepsilon_i^2] = E[\mu_i^2] + W^T M W + 2R^T W \quad (11)$$

Графики поверхностей рабочей функции управления (рисунок 1 а) и рабочей функции с компенсированной ошибкой управления (рисунок 1 б) определяют достижимые значения параметров управления показателей эффективности комплекса (1-5).



а) Рабочая функция управления $\delta_i(x_i \mu_i) = \sin \sqrt{x^2 + \mu^2} / 2\pi F_d$



б) Рабочая функция управления с компенсацией ошибки

$$\delta_i(x_i \mu_i) = \frac{\sin(\pi \sqrt{x_i^2 + \mu_i^2})}{\pi \sqrt{x_i^2 + \mu_i^2}}$$

Рис. 1 Графики поверхностей рабочей функции управления параметра показателя технической производительности

Цель исследования: разработка качественных и количественных показателей движительно-рулевого комплекса для синтеза дискретного ПИД регулятора скорости.

Постановка задачи – разработка системного показателя качества управления телеуправляемых необитаемых аппаратов по параметрам статической устойчивости и рабочей производительности.

Математическая модель адаптируемой системы управления

Основу статической устойчивости ТНПА составляют профили и формы конструкции лёгкого и прочного корпуса ТНПА. Выбором компоновки и профилей стараются получить такие показатели, при которых положение ТНПА в статике остаётся определённым. Центровка ТНПА должна сохранять своё выбранное положение, не должны происходить смещения ТНПА при работе бортовых инструментов. Однако на практике эти условия выполнить сложно и при отработке конструкции статическая устойчивость и динамика оказываются связаны набором противоречивых требований.

Суммарная кинетическая энергия ТНПА [5-6]:

$$T = \frac{1}{2} [V_x V_y V_z \omega_x \omega_y \omega_z] \times \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & J_{xz} + \lambda_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{xx} + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{yy} + \lambda_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{zz} + \lambda_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $[V, \Omega] = [V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]$ – проекции линейных и угловых скоростей на связанную систему координат;

$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ [кг] – коэффициенты присоединённых масс ТНПА;

$\lambda_{16}, \lambda_{34}$ [кг · м] – момент присоединённых масс, относительно продольной оси ТНПА;

$\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ [кг · м²] – момент инерции присоединённых масс ТНПА.

Дискретный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор реализуется как трёхканальная подсистема, входной сигнал которой реализуется как разность между задаваемым значением скорости и значением, поступающим с вычислителя канала обратной связи.

Регулятор пропорциональной составляющей формирует выходную переменную, которая связана со входом пропорционально коэффициенту усиления:

$$u_p = K_p v \quad (13)$$

Интегральная составляющая характеризует точность системы управления в установившемся режиме и связана с входной переменной:

$$u_i = K_i \int_{t_0}^t v dt. \quad (14)$$

Интегральная составляющая может задаваться минимальным и максимальным значениями, определяемыми реакцией системы (раскачивание системы), и изменение пределов интегрирования, которые мы будем считать параметрами масштаба определяют точность реакции системы управления.

Дифференциальная составляющая ПИД регулятора обеспечивает опережение системы управления по фазе:

$$u_d = K_d \dot{v}. \quad (15)$$

Этот параметр связан с показателем эффективности системы (1-7), а также с параметрами ПИД регулятора по показателю скорости $\dot{v}$, и статической устойчивости включающей параметр интегральной составляющей, пропорциональная составляющая связана с показателем мощности ДРК.

Учитывая, что ТНПА имеет нейтральную плавучесть, движительно-рулевой комплекс обрабатывает динамику непрерывно, компенсируя течение, снос и перемещение судна носителя.

Оценим альтернативы формирования оптимального управления ТНПА в соответствии с общим алгоритмом [6-8].

Значение скорости $\dot{v}_i$ учитывает силы и моменты развиваемые ДРК для перемещения и выполнение программы работы бортовых инструментов. Величина скорости может считаться центрированной величиной $\dot{v}_i$ определяемой набором некоторой статистики, также как и ошибка управления $\dot{\varepsilon}$:

$$v_i(t) = v_0(t) + \varepsilon(t) \quad (16)$$

Тогда для линейного закона управления:

$$v_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) u'(t - \tau) d\tau, \quad (17)$$

где $w(\tau)$ – функция весовых коэффициентов системы, $u(t)$ – закон управления, соответственно $u'(t - \tau)$ – изменение закона управления, обеспечивающего $\bar{\varepsilon}^2$ – минимум среднеквадратического значения ошибки.

Рабочее преобразование:

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) u'(t - \tau) d\tau - v_0(t), \quad (18)$$

при $w(t) = 0$.

Возводя в квадрат обе части (18), получим:

$$\varepsilon^2(t) = v_0^2(t) - 2v_0(t) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) u'(t - \tau) d\tau - v_0(t) - \left[\int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) u'(t - \tau) d\tau \right]^2. \quad (19)$$

Математические ожидания функций входящих в (19) определяются как:

$$\begin{aligned} M[v_0^2(t)] &= K_{v_0}(0), \\ M[v_0(t) \cdot u'(t - \tau)] &= K_{v_0 u'}(\tau), \\ M[u'(t - \tau) \cdot u'(t - \delta)] &= K_{u'}(\tau - \delta), \end{aligned} \quad (20)$$

С учётом (20) и (19), выражение для минимума среднего квадрата ошибки:

$$E[\bar{\varepsilon}^2] = K_{v_0}(0) - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) K_{v_0 u'}(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} w(\delta) K_{u'}(\tau - \delta) d\delta. \quad (21)$$

С учётом (21) минимальное значение квадрата ошибки определяется приближением корреляционных функций, поэтому если удастся точно вычислить значения этих функций, то вычисления весовых коэффициентов даёт хорошее приближение вычисления значения сигнала управления $u'(t)$ к значениям скорости $v_i(t)$.

Рассмотрим решение задачи управления использованием метода динамического программирования и принципа максимума.

Для решения задачи в такой постановке нужно сделать одно принципиально важное допущение, изменение скорости может происходить не только в прямом, но и в обратном направлении, т.е. кривая управления может быть нелинейной и соответствует изменению параметра скорости.

Введём критерий качества управления:

$$E = \int_0^T Q(v_1, v_2 \dots v_n, t, u) dt + R[v_1(T), v_2(T) \dots v_n(T), T], \quad (22)$$

где функции Q и R связаны с задаваемыми значениями скорости и отражают закон распределения в этих параметрах.

Время выборки T минимально возможное значение функции для выбранного интервала разбиения траектории изменения фазовой функции $\dot{v}_i$, а для всего времени выборки зададим отсчёты [7-10]:

$$\begin{cases} T[t_1, t_2, \dots, t_n], \\ t'_i = t_i + \Delta t. \end{cases}$$

Критерий оптимальности можно записать как

$$Q[v_1(t), v_2(t) \dots v_n(t), t] = \min_{u(\tau)} \left\{ \int_0^T Q[v_1, v_2 \dots v_n, t, u(\tau)] d\tau + R[v_1(T), v_2(T) \dots v_n(T), T] \right\} \quad (23)$$

Интеграл в (23) можно вычислить по частям:

$$Q(v_i, t) = \min_{u(\tau)} \left[\int_t^{t+\Delta t} Q_i(v_i, \tau, u) d\tau + \int_{t+\Delta t}^T Q_i(v_i, \tau, u) d\tau \right]. \quad (24)$$

Следующее допущение касается приращения аргумента Δt , выбор его пределах относительно инерционности изменения $\dot{v}_i$, позволит в первом интеграле (24) реализовать упрощение задачи, а во втором интеграле выполним замену переменной интегрирования $\tau = \vartheta$:

$$Q(v_i, t) = \min_{u(\tau)} \left\{ Q_i[v_i(t), t, u] \Delta t + \int_{t+\Delta t}^T Q_i[v_i(\vartheta), \vartheta, u(\vartheta)] \Delta \vartheta + Q_{i+1}(\Delta t) \right\}. \quad (25)$$

Замена переменной интегрирования позволяет преобразовать (25) к виду:

$$Q(v, t) = \min_{u(\tau)} \left\{ Q_i[v_i(t), t, u] \Delta t + \min_{u(\vartheta)} \int_{t+\Delta t}^T Q_i[v_i(\vartheta), \vartheta, u(\vartheta)] \Delta \vartheta \right\} + Q_{i+1}(\Delta t), \quad (26)$$

учитывая, что

$$\min_{u(\vartheta)} \int_{t+\Delta t}^T Q_i[v_i(\vartheta), \vartheta, u(\vartheta)] \Delta \vartheta = Q_i[v_i(t'), t'], \quad (27)$$

получим

$$Q(v, t) = \min_{u(\tau)} \{ Q_i[v_i(t), t, u] \Delta t + Q_i[v_i(t'), t'] \} + Q_{i+1}(\Delta t). \quad (28)$$

Последовательно раскладывая в ряд Тейлора функции $t_i(t + \Delta t)$:

$$v_i(t') = v_i(t) + \dot{v}_i(t) \Delta t + Q_2(\Delta t) \quad (29)$$

где $Q_2(\Delta t)$ – функция второго порядка малости.

$$Q[v_i(t'), t'] = Q[v_i(t + \Delta t), t + \Delta t] = Q[v_i(t) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Q}{\partial v_i} v_i(v_i, t, u) \Delta t + \frac{\partial Q_2}{\partial t} \Delta t + Q_3(\Delta t)]. \quad (30)$$

Пренебрегая производными $Q_3(\Delta t)$ как высшими порядками малости, не оказывающие влияние на изменение параметра v_i , и устремив $\Delta t \rightarrow 0$, приходим к уравнению Беллмана:

$$-\frac{\partial Q}{\partial t} = \min_u \left\{ Q_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Q}{\partial v_i} [\sum_{j=1}^n a_{ij} v_j + b_i u + f_i(t)] \right\}, \quad (31)$$

где a_{ij} и b_i – коэффициенты линейной функции аппроксимации распределения $v_i, v_j, f_i(t)$ – функция возмущения.

Окончательно структура для оптимального управления:

$$u(t) = u(v_1, v_2, \dots, v_n, t, \frac{\partial Q}{\partial v_1}, \dots, \partial Q / \partial v_n). \quad (32)$$

Параметр численного интегрирования примем по методу Эйлера (реализовывается разностная схема), используя для вычисления два значения переменной: $u(Tk)$ – входная и $u(T(k-1))$ – выходная. Таким образом элемент задержки связан с инерционностью системы, вызванной

присоединёнными массами на направление движения:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \int_{T(k-1)}^{Tk} iu(k-1-q)dt \quad (33)$$

где $u_i(k-1)$ – элемент задержки, вызванный присоединёнными массами на направление движения; q – составляющая присоединённой массы, реализующая запаздывание при изменении динамики переключением ДРК.

Дифференциальная составляющая, левая разностная производная $u_d(k)$, для которой первая аппроксимация, в точке k :

$$u_d(k) = \frac{v(k) - v(k-1)}{T}. \quad (34)$$

Передаточная функция численного дифференцирования вида получена методом интегрирования по неявному методу Эйлера – приближённого метода вычисления определённого интеграла основанного на записи разностного уравнения:

$$u_d(k) = v(k-1) + Tv(k), \quad (35)$$

или в дискретной форме z-преобразования:

$$\frac{u_d(z)}{v(z)} = \frac{k_d}{T} \left(\frac{z-1}{z} \right). \quad (36)$$

Рассмотрим математическую модель телеуправляемого необитаемого аппарата, с параметрами: длина $L = 1200$ мм; ширина $a_{max} = 1290$ мм и $a_{min} = 1200$ мм, высота $h = 1372$ мм, водоизмещение $DW = 1200$ дм³. Аэротрубная модель, масштаба 1:5, приведена на рисунке 2. Для рассматриваемого аппарата значения присоединённых масс аппарата: $\lambda_{11} = 160$ кг, $\lambda_{22} = 2400$ кг, $\lambda_{33} = 540$ кг, $\lambda_{16} = 50$ кг·м, $\lambda_{34} = -550$ кг·м, $\lambda_{44} = 300$ кг·м², $\lambda_{55} = 120$ кг·м², $\lambda_{66} = 420$ кг·м².

В результате аэродинамических экспериментов получены значения коэффициентов сопротивления и моменты приведённое на рисунке 4, значения скорости потока соответствовали фактическим для натуры $v_{нат} = 0 \div 1,5$ м/с.

Тогда запишем систему дифференциальных уравнений для телеуправляемого аппарата. С учётом этого, в описанной выше связанной с ТНПА системе координат выражения для вычисления гидродинамических сил и моментов, действующих на ТНПА, могут быть записаны в виде:

$$X = -160 \frac{dv_x}{dt} - 540 v_z \omega_y + 1800 v_y \omega_z - 270 (v_x + 0,5 \omega_x) |v_x + 0,5 \omega_x|,$$

$$Y = -1800 \frac{dv_y}{dt} - 160 v_x \omega_z + 540 v_z \omega_x - 1560 v_y |v_y|,$$

$$Z = -540 \frac{dv_z}{dt} - 1800 v_y \omega_x + 160 v_x \omega_y - 400 (v_z - 0,5 \omega_x) |v_z - 0,5 \omega_x|,$$

$$M_x = -300 \frac{d\omega_x}{dt} + 550 \frac{dv_z}{dt} + 1000 v_y v_z + 200 (v_z - 0,5 \omega_x) |v_x - 0,5 \omega_x|,$$

$$M_y = -120 \frac{d\omega_y}{dt} + 550 v_z \omega_z - 500 v_x \omega_x + 300 v_x v_z - 150 \omega_y |v_y|,$$

$$M_z = -420 \frac{d\omega_z}{dt} - 50 \frac{dv_z}{dt} - 550 v_z \omega_y - 1400 v_x v_y + 50 v_y \omega_z - 150 (v_x + 0,5 \omega_x) |v_x + 0,5 \omega_x|. \quad (37)$$

Структурная схема дискретного ПИД-регулятора скоростей в зависимости от создаваемых упоров ДРК в трёх плоскостях показана на рисунке 4. Вес телеуправляемого комплекса составляет 1,2 тонны, количество движителей семь, мощность ДРК составляет величину 42 кВт (каждого 6 кВт). Модель выполнена средствами Simulink 4.0 программного комплекса Matlab. Компоновка модели ТНПА

показана на рисунке 2. Модель выполнена в масштабе 1:3.5 и исследовалась в ходе азотрубного эксперимента.

Параметр μ в рассматриваемом регуляторе это синтезируемая (характеристика) регулятора, с решающими обратными связями в блоках «speed coef» и «Pressure force».

Для пропорционально-дифференциального интегрального регулятора:

$$m \frac{dv_x}{dt} = P_x - P_f - P_{st} \quad (38)$$

где $P_f = \frac{C_x S_x \rho V_x^2}{2}$, сила сопротивления движению по оси x ;

параметр

$A = \frac{\rho V_x^2}{2}$ – скоростной напор потока жидкости при движении ТНПА;

V_x – скорость ТНПА v_x

v_f – составляющая скорости встречного потока

P_{st} – проекция силы тяжести имеет отрицательное значение в силу небольшой положительной плавучести.

Уравнение пропорционального регулятора:

$$P_{cx} = K_{cx}(v_{зад} - v), \quad (39)$$

где P_{cx} – сила тяги (торможения) движителей;

$v_{зад}$ – заданная величина скорости (м/с);

K_{cx} – коэффициент обратной связи.

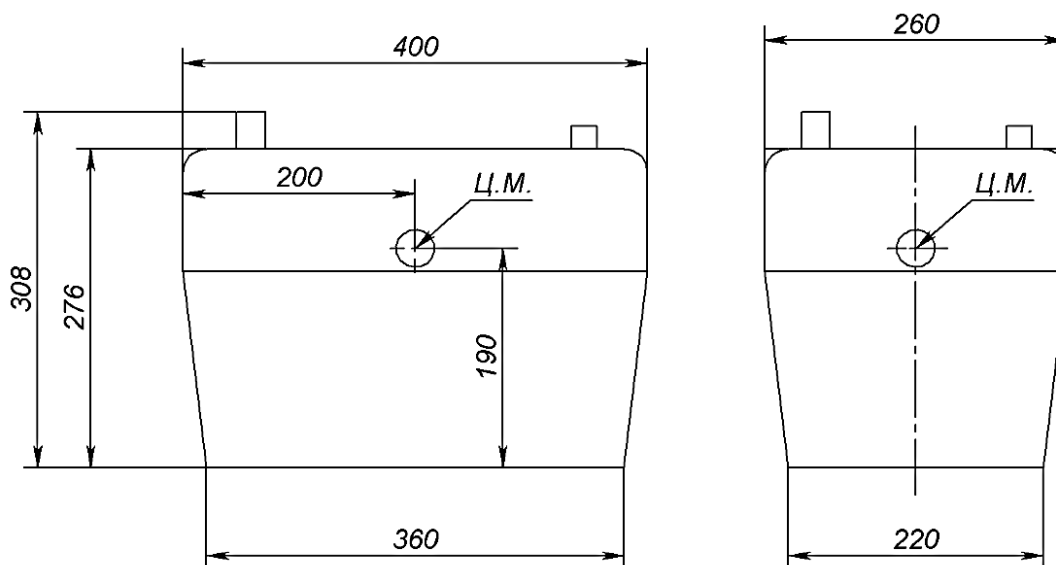
Гидродинамические безразмерные коэффициенты, входящие в (37-38) определяются:

$$\vec{C}_x = \frac{P_f}{AS_x}, \quad \vec{m}_x = \frac{\vec{M}}{AS_x L}, \quad (40)$$

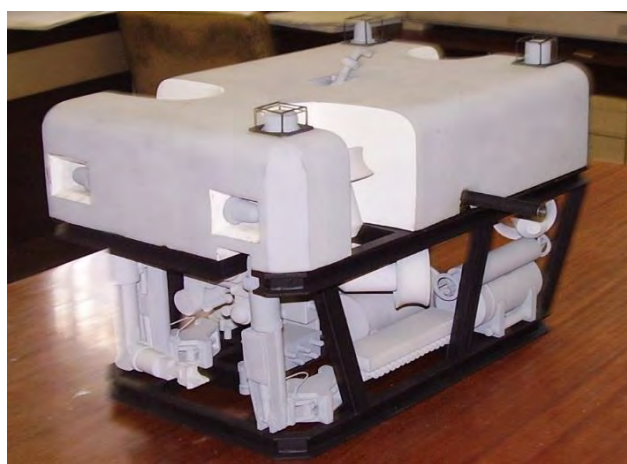
где $\vec{C}_x$, $\vec{m}_x$ – гидродинамические коэффициенты силы и момента;

S_x – характерная проекция площади на ось движения;

L – линейный размер ТНПА.



а)



б)

Рис.2 Азотрубная модель телеуправляемого необитаемого аппарата, продувавшаяся в азродинамической трубе а) размерения модели (размеры указаны в мм); б) фото модели

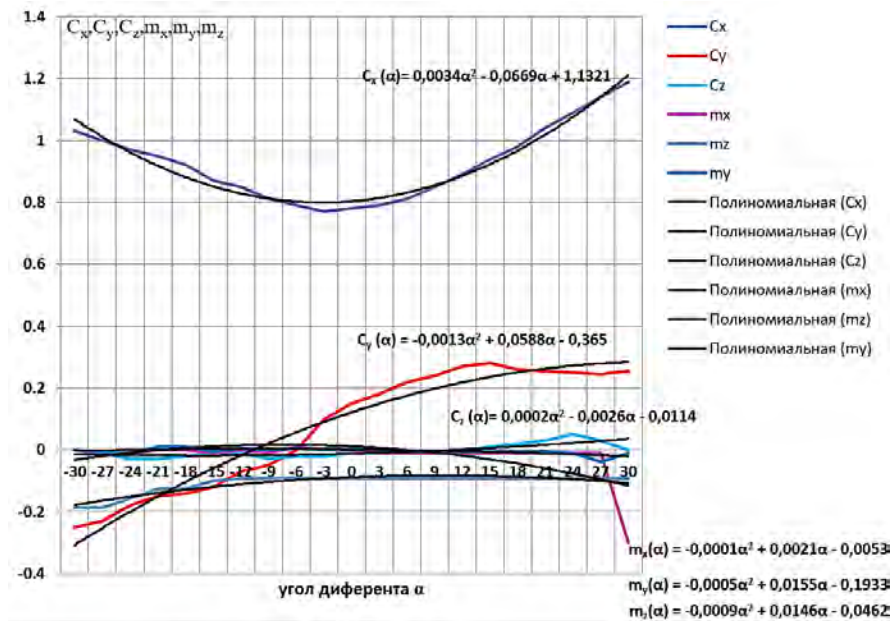


Рис. 3 Интерполяция коэффициентов сопротивления движению ТПА при изменении угла дифферента с уравнениями аппроксимации

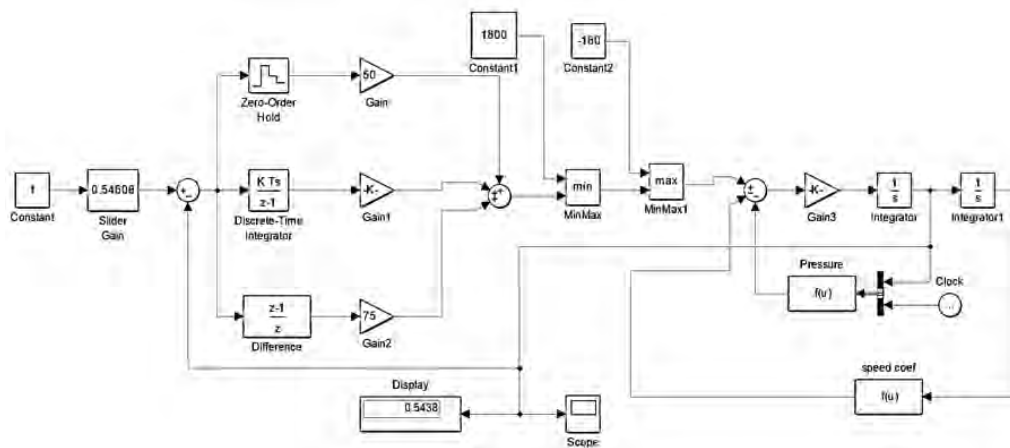


Рис. 4 – Структурная схема дискретного ПИД-регулятора скоростей ДРК телеуправляемого аппарата

Важнейшим параметром, являются коэффициенты сопротивления проекции аппарата на направление движения, с этой целью выполнены продувки модели, изображённой на рисунке 2 (компоновка соответствует натуре), в аэротрубном эксперименте, рисунок 3.

В синтезируемом ПИД регуляторе параметры скорости устанавливаются в пределах $0 \div 1.5$ м/с, параметры выбираются как параметры моделей движителей $K_p = 50$, $K_i = 0.75$, $K_d = 75$.

Присоединённые массы учитываются в блоках Constant1 и Constant2, как показатели инерционности модели при рассмотрении динамики в продольно-поперечной плоскости.

Сопротивление потоку, записывается как уравнение формы прямого программирования $0.0034 \cdot u[1]^2 - 0.0669 \cdot u[1] + 1.1321$, в блок «speed coef».

Аналогично в блок «Pressure» записывается уравнение позиции ТПА, в проекции на вертикальную ось, в форме структуры уравнения прямого программирования $0.001 \cdot (u[1] + 20 \cdot \sin(0.01 \cdot u[2]))^2$.

Моделирование динамики ТПА рассматриваемой компоновки производилось при различных заданиях скорости движения в продольно-поперечной плоскости, при этом рассчитанные значения задания коэффициента, как показано на рисунке 5 и 6, рассматривалось с позиции показателя технической производительности (5), параметра (6).

Сопротивление потоку при движении ТПА было определено на стадии продувки модели в аэродинамической трубе с учётом на параметры натуре.

Как и ожидалось компоновка ТПА, как соотношение длины к ширине и высоте, при ламинарном потоке идеальной жидкости позволяет рассчитать оптимальные с точки зрения критериев (23-33) значения параметров ПИД регулятора. В задаче оптимизации параметра μ метод динамического программирования и принципа максимума (прямого программирования Белмана) даёт наилучший результат.

Наибольшее значение технической производительности достигается при линейном виде

характеристики, приведённой на рисунке 6б. Реализация даёт хорошие результаты при выборе изменения шага коэффициента K_p равного первому порядку малости, таким образом значение μ стремится к единице, что соответствует значению параметра 20 дБ/дек.

При выборе варианта компоновки лёгкого и прочного корпуса ТНПА существенной оказывается зависимость с одной стороны от статической устойчивости, которая реализуется

присоединёнными массами к системе плавучести [11-12], а с другой требует получения достаточно обтекаемых форм, обеспечивающих выбор в альтернативе сохранения пространственного положения – наименьшее сопротивление движению.

ПИД регулятор, разработанный в рамках этой работы, позволяет получать хорошие характеристики при выборе настроек регулятора, и при соответствующем выборе параметров при инициализации системы позволяет получать практически пропорциональное управление.

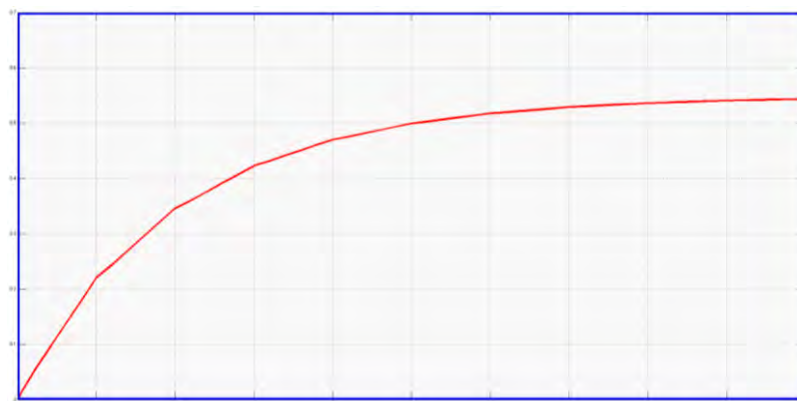
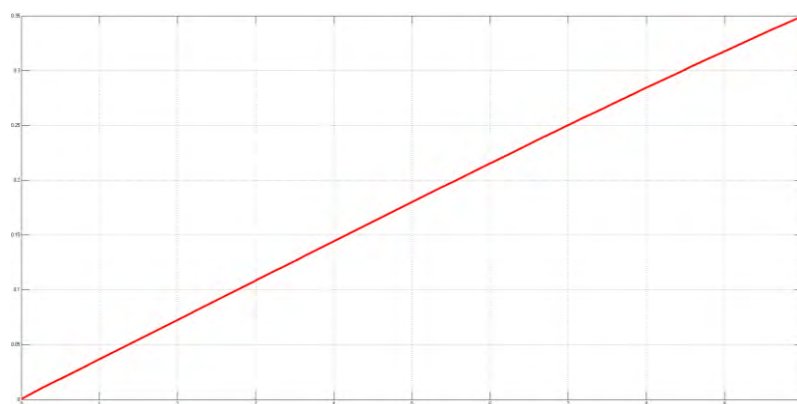


Рис. 5 – график изменения скорости движения ТНПА при заданных параметрах скорости и настройках регулятора, как показано на рисунке 3 ($K_p = 50$)



а)



б)

Рис. 6 График изменения скорости ТНПА при значениях настройки пропорциональной составляющей:
а) $K_p = 7$; б) $K_p = 10$

Оптимальным с точки зрения управления является выбор задаваемой скорости с величиной $\mu = 20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, коэффициент усиления ($K_p = 10$).

При этом выбирая методы управления необходимо добиваться контроля положения ТНПА в рамках исследованных на модели.

Размещение комплекса бортовых инструментов также необходимо выполнить с допустимыми изменениями положения ТНПА при активном их использовании, положение ТНПА и качество динамики при этом не должно существенно ухудшиться.

Заключение

Синтез регулятора скоростей движительно-рулевого комплекса по параметрам, формирующим показатели эффективности телеуправляемых необитаемых аппаратов, учитывает величины

присоединённых масс и величины отношения фактической скорости к развиваемой.

Задача синтеза оптимального управления по критерию минимума среднеквадратического значения ошибки, тем не менее имеет большие вычислительные трудности в сравнение с методом динамического программирования.

Оптимальным параметром, характеризующим опережение параметра по фазе, является дифференциальная составляющая регулятора. При синтезе регулятора желаемой величиной параметра скоростной динамики отношения фактической скорости к возможной стоит считать величину $\mu = 20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$.

Идентификация системы должна обеспечивать оценку присоединённых масс на направление движения, пространственное положение аппарата, и сопротивление движению.

Литература

1. Гайдук А. Р., Капустян С. Г., Шаповалов И. О. Алгоритм управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности. *Инженерный вестник Дона*. 2018. №. 3 (50). С. 89.
2. Шпекторов, Андрей Григорьевич, and Ван Туан Фам. Нечеткое управление глубиной погружения телеуправляемого подводного аппарата. *Морские интеллектуальные технологии* 3-1 (2019): 161-165.
3. Gayvoronskiy, S., Ezangina, T., Khozhaev, I., & Kazmin, V. Determination of vertices and edges in a parametric polytope to analyze root indices of robust control quality. *International Journal of Automation and Computing*. 2019. Т. 16. №. 6. С. 828-837.
4. А. Р. Гайдук, Н. Н. Прокопенко, А. В. Бугакова, "Компенсация ошибок, вызванных временной задержкой цифровых датчиков", *Информатика и автоматизация*, **22:4** (2023), 826–852
5. Гайкович, А. И., Никитин, Н. В., Суслов, А. Н., & Хань. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана. *Морские интеллектуальные технологии*, 2019, С. 80
6. Dantsevich I.M., Lyutikova M.N., Fedorenko V.V. Numerical method for correcting command signals for combined control of a multiengine complex. *International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems*. Cham: Springer International Publishing, pp. 117-131 (2022).
7. Dantsevich, I.M., Lyutikova, M. N., & Samoylenko, I. V. Numerical Simulation of the Control System of the Propulsion-Steering System of Tele-Controlled Uninhabited Vehicles. In *International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems* Cham: Springer International Publishing, pp. 103-115 (2022).
8. Дергилев А.И., Жук С.С., Аванесова Т.П. Реализация системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве, *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4 часть 1, С. 16-21.
9. Дегтярь В.Г., Пегов В.И., Мошкин И.Ю., Степанов В.В., Семёнов А.А., Хлыбов В.И. Разработка программно-методического обеспечения гидродинамики и динамики подводных аппаратов. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2015;(1):88-93.
10. Пшихопов, В. Х., & Медведев, М. Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных. *Инженерный вестник Дона*, 16(6), 2011, с. 169-175.
11. Юревич, Евгений Иванович. *Основы робототехники*, 4 изд. БХВ-Петербург, 2018.
12. Короткин А. И. Присоединенные массы судна: Справочник. Л.: Судостроение. 1986. Т. 311. №. 1.

References

1. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Algorithm for controlling the movement of a group of mobile robots in conditions of uncertainty. *Don's Engineering Herald*. 2018. №. 3 (50). p. 89.
2. Shpektorov, Andrey Grigorievich, and Van Tuan Fam. Unclear control of the depth of immersion of a remote-controlled underwater vehicle. *Marine Intelligent Technology* 3-1 (2019): pp.161-165.
3. Gayvoronskiy, S., Ezangina, T., Khozhaev, I., & Kazmin, V. Determination of vertices and edges in a parametric polytope to analyze root indices of robust control quality. *International Journal of Automation and Computing*. 2019. Т. 16. №. 6. pp. 828-837.
4. A. R. Gaiduk, N. N. Prokopenko, A. V. Bugakova, "Compensation for errors caused by time delay of digital sensors," *Informatics and Automation*, **22:4** (2023), pp. 826-852
5. Gaikovich, A.I., Nikitin, N.V., Suslov, A.N., & Han. Analytical method for determining the power capacity of a catamaran power plant. *Marine Intelligent Technologies*, 2019, p. 80
6. Dantsevich I.M., Lyutikova M.N., Fedorenko V.V. Numerical method for correcting command signals for combined control of a multiengine complex. *International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems*. Cham: Springer International Publishing, pp. 117-131 (2022).

7. Dantsevich, I.M., Lyutikova, M. N., & Samoylenko, I. V. Numerical Simulation of the Control System of the Propulsion-Steering System of Tele-Controlled Uninhabited Vehicles. In International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems Cham: Springer International Publishing, pp. 103-115 (2022).
8. Dergilev A.I., Zhuk S.S., Avanesova T.P. Implementation of the initial data filtering system in the technology of high-precision positioning of the hull of a sea vessel in space, Marine intelligent technologies. 2023. No. 4 part 1, S. 16-21.
9. Degtyar V.G., Pegov V.I., Moshkin I.Yu., Stepanov V.V., Semenov A.A., Khlybov V.I. Development of software and methodological support for hydrodynamics and dynamics of underwater vehicles. Bulletin of the Concern of East Kazakhstan region "Almaz - Antey." 2015;(1). pp. 88-93.
10. Pshikhopov, V. Kh., & Medvedev, M. Yu. Algorithmic support of robust asymptotic observers of derivatives. Engineering Bulletin of the Don, 16 (6), 2011, p. 169-175.
11. Yurevich, Evgeny Ivanovich. Fundamentals of Robotics, 4th ed. BHV-Petersburg, 2018.
12. Korotkin A.I. Attached masses of the vessel: Reference book. L.: Shipbuilding. 1986. T. 311. №. 1.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Данцевич Игорь Михайлович кандидат технических наук, исполнительный директор НИИ: ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93. e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Igor M. Dantsevich Ph.D. (Eng), Executive Director of Research Institute: Admiral Ushakov maritime state university, 353924, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D. (Eng), Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.02.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 26.03.2024.

Научная статья

УДК 629.127/004

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.023>

Анализ показателей эффективности подводных буксируемых комплексов по параметрам устойчивости и управляемости

Лютикова М.Н.¹ mnlyutikova@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе рассмотрен системный подход анализа и синтеза показателей носителя нейтральной плавучести универсального многоцелевого буксируемого геофизического подводного комплекса. В основу системного подхода предложены показатели энергоэффективности, статической и динамической устойчивости. Статическая устойчивость определяется соотношением параметров веса, размерами и геометрией отсеков плавучести лёгкого корпуса. Форма и центровка блоков плавучести лёгкого корпуса с учётом присоединённых масс связаны с величинами скорости буксировки и угла наклона буксирной линии. Достижение статической устойчивости определяется набором альтернатив обтекаемых или необтекаемых форм, а также размеров и соотношением геометрических размеров носителя нейтральной плавучести, обеспечивающих требуемые показатели назначения. Динамическая устойчивость связана с параметрами статической и определяет достижимые параметры качества динамики при буксировке на заданной глубине хода универсального многоцелевого буксируемого комплекса. Выбор и проработка комплекса учитывает изменение параметров плотности воды в зависимости от глубины хода, рыскания и боковой и курсовой устойчивости. Определены соотношения длины, ширины и высоты носителя нейтральной плавучести, а также варианты получения необходимых параметров устройством гидродинамических профилей, крыльев, пластин. Динамическая устойчивость связана с временем стабилизации носителя нейтральной плавучести при изменении высоты хода над донной поверхностью, а также чувствительности на изменение скорости буксировки и изменения длины и угла буксирной линии. Системный анализ, построенный на показателях энергоэффективности, статической и динамической устойчивости в достижимых альтернативах определяет качественную и количественную меру параметров в величинах размерности, веса и запаса плавучести.

Ключевые слова: гидродинамическая устойчивость, гидродинамические коэффициенты управления, динамическая устойчивость, математическая модель, носитель нейтральной плавучести, схема компоновки, энергоэффективность, универсальный многоцелевой буксируемый комплекс.

Для цитирования: Лютикова М.Н. Системный анализ показателей эффективности подводных буксируемых комплексов по параметрам устойчивости и управляемости, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 198—207. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.023

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.023>

Analysis of performance indicators underwater towed systems by parameters stability and controllability

Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. In the paper considers a systematic approach to the analysis and synthesis of indicators of the neutral buoyancy carrier of a universal multi-purpose towed geophysical underwater complex. The indicators of energy efficiency, static and dynamic stability are proposed as the basis of the systematic approach. Static stability is determined by the ratio of weight parameters, dimensions and geometry of the buoyancy compartments of the lightweight hull. The shape and alignment of the buoyancy blocks of the light hull, taking into account the attached masses, are related to the values of the towing speed and the angle of inclination of the tow line. The achievement of static stability is determined by a set of alternatives to streamlined or non-streamlined shapes, as well as the dimensions and ratio of geometric dimensions of the neutral buoyancy carrier, which provide the required destination indicators. Dynamic stability is related to the parameters of static stability and determines the achievable parameters of the quality of dynamics when towing at a given stroke depth of a universal multi-purpose towed complex. The selection and development of the complex takes into account the change in water density parameters depending on the depth of travel, yaw and lateral and directional stability. The ratios of the length, width and height of the neutral buoyancy carrier are determined, as well as options for obtaining the necessary parameters by the device of hydrodynamic profiles, wings, plates. Dynamic stability is related to the stabilization time of the neutral buoyancy carrier when the stroke height above the bottom surface changes, as well as sensitivity to changes in towing speed and changes in the length and angle of the tow line. A system analysis based on indicators of energy efficiency, static and dynamic stability in achievable alternatives determines the qualitative and quantitative measure of parameters in terms of dimension, weight and buoyancy reserve.

Keywords: hydrodynamic stability, hydrodynamic control coefficients, dynamic stability, mathematical model, neutral buoyancy carrier, layout diagram, energy efficiency, universal multi-purpose towed complex.

For citation: Marina N. Lyutikova System analysis of performance indicators of underwater towed complexes in terms of stability and controllability parameters, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 198—207. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.023

Введение

Разработка и создание универсальных многоцелевых буксируемых комплексов (УМБК) строится на анализе достижимых показателей эффективности:

- энергоэффективность;
- устойчивость;
- управляемость.

Показатели энергоэффективности характеризуются отношением объёмного водоизмещения и электрической мощности, расходуемой комплексом при выполнении программы подводных геофизических исследований:

$$E_w = \frac{DW}{N_{\text{потр.}}} \quad (1)$$

где DW – объёмное водоизмещение в кг, $N_{\text{потр.}}$ – потребляемая мощность в кВт.

Вопросы энергоэффективности получили дальнейшее развитие благодаря работам Рулевского В.М. [1-2]. В работах [3-4] изложены основные вопросы создания и практического применения подводных аппаратов, а также средства их обеспечения для исследования и освоения океана.

Вопросы системного анализа устойчивости и управляемости буксируемых подводных комплексов ранее рассматривались в работах [7]. Исследование и разработка проводились в полунатурных экспериментах, при различных способах компоновки и режимах буксировки систем [8-9]. В настоящей работе исследуются показатели оценок статической и динамической устойчивости, а также управляемости буксируемых подводных комплексов.

Цель работы состоит в определении оценок устойчивости и управляемости забортовых буксируемых геофизических комплексов.

Методы и средства исследования

Известна общая модель динамики морских подвижных объектов [6]:

$$E_k = 0,5[V^T \Omega^T] (M + \Lambda) \begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E_k – обобщённая кинетическая энергия буксируемого комплекса, V^T – вектор скоростей в трёх плоскостях, Ω^T – вектор угловых скоростей, M – матрица инерции носителя нейтральной плавучести (ННП) (составляющего совместно с гаражом-заглубителем (ГЗ) УМБК), Λ – матрица присоединённых масс.

Определим устойчивость как составляющие:

- статическая;
 - динамическая.
- Статическая включает:
- продольную;
 - боковую (поперечную и путевую).

Динамическая устойчивость обеспечивается использованием средств активного управления. Всего в плане прямоугольной платформы носителя расположены три движителя (рис.1) и один расположен в горизонтальной плоскости (рис. 2).

Движение УМБК рассматривается в идеальной жидкости, с числами Рейнольдса 1000-1200.

Для сил и моментов возникающих при буксировке УМБК:

$$\begin{cases} P_y = c_y \cdot \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_y}{2} \\ P_x = c_x \cdot \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_x}{2} \\ M_z = c_m \cdot \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_b}{2} \end{cases} \quad (3)$$

где P_y – сила сопротивления потоку по оси y , P_x – сила сопротивления потоку x , M_z – разворачивающий момент возникающий при буксировании, c_y, c_x – коэффициенты сопротивления проекции УМБК, c_m – коэффициент сопротивления момента, S_y, S_x – площади проекции на оси движения, S_b – проекция площади сопротивления момента.

Особенностью применения ННП является желаемый тип движения с небольшим углом атаки, такое требование вытекает из необходимости создания профиля гидроакустического обзора донной поверхности. Лучший вариант съёмки предусматривает перспективный план сканирования.

Второе требование хорошей стабилизации ННП, вытекает для получения качественной видеосъёмки.

Исходя из рассмотренных особенностей динамики и наличия блоков обеспечения нейтральной плавучести требования к продольной устойчивости – это способность восстанавливать продольное равновесие без отработки движителями активного управления, тогда продольная управляемость – это способность изменять положение при активном воздействии движителей.

Аналогично сформулируем определение поперечной устойчивости – это способность восстанавливать заданное положение без активного управления движителями, а поперечная управляемость – это способность восстанавливать положение при равномерной буксировке без воздействия движителей.

Анализ выражения (3) при условии нейтральной плавучести позволяет говорить о зависимости выбранных профилей лёгкого и прочного корпусов (коэффициенты сопротивления, а также площади проекций).

Требования продольной статической устойчивости приводят к выбору характерной длины ННП в отношении к поперечному размеру.

Момент, вызванный усилием буксирной линии, требует уравнивания гидродинамической пластиной в задней части, и соответственно уравнивания боковыми пластинами, как показано на рисунке 1 и 2.

Применение гидродинамических уравнивающих пластин приводит к образованию фокуса блока плавучести, т.е. точки, в которой момент в результате действия возмущающих сил не изменяется. Фокус имеет ещё одно определение, как точка приложения возникающей подъёмной силы УМБК при изменении угла линии буксировки [9-12].

Выбор параметров блока плавучести происходит из соображения необходимости выбора объёмного

водоизмещения, обеспечивающего необходимый запас плавучести. Основная функция которого состоит как раз в компенсации веса собственной конструкции, вызванной выбором необходимых запасов прочности лёгкого корпуса и веса элементов прочного корпуса ННП.

Учитывая изменения скорости и условий буксировки: температуры, солёности и глубины (при изменении которой происходит изменения плотности, вызванной давлением), можно говорить о некоем диапазоне изменения центровок УМБК.

Степень продольной статической устойчивости определим как отношение изменения коэффициента дифферента к изменению угла буксирной линии на $\alpha = 1^\circ$:

$$m_z^\alpha = \frac{\Delta m_z}{\Delta \alpha} = \frac{m_{z2} - m_{z1}}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{m_{z2} - m_{z1}}{c_{y2} - c_{y1}}. \quad (4)$$

При $m_z^\alpha < 0$ и $m_z^{c_y} < 0$ ННП будет обладать продольной статической устойчивостью по дифференту, при изменении угла буксировки УМБК при сохранении положения изменит высоту хода над донной поверхностью:

$$m_z^{c_y} = \frac{\Delta m_z}{\Delta c_y} = \frac{x_T - x_\Phi}{b}, \quad (5)$$

где x_T – координата точки центровки, x_Φ – координата точки фокуса, b – хорда блока плавучести, $x_T - x_\Phi$ – запас центровки ННП.

При изменении угла буксировки вследствие изменения скорости судна буксировщика центр тяжести смещается вследствие давления жидкости на УМБК к фокусу блока плавучести.

Смещение центра тяжести при центровке ННП вперёд, как следует из (5) приведёт к увеличению коэффициента продольной устойчивости (увеличению запаса устойчивости), однако на небольших скоростях буксировки возможно появление дифферента уже на переднюю часть.

В связи с вышеуказанным обстоятельством, оценивание продольной статической устойчивости необходимо производить с учётом коэффициента продольного момента дифферента (коэффициент момента дифферента):

$$m_z = \frac{M_z}{(\rho v^2 / 2) \cdot S \cdot b} \quad (6)$$

где плотность воды ρ – в зависимости от глубины (высоты хода) может изменяться весьма значительно 0,5-1% вызванное фактором дополнительного давления в зависимости от глубины.

Степень (мерой) продольной устойчивости считаем приращение значения коэффициента дифферента к приращению угла буксировки:

$$m_z^\alpha = \frac{\Delta m_z}{\Delta \alpha} = \frac{m_{z2} - m_{z1}}{\Delta \alpha} \quad (7)$$

где $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ – приращение угла буксировки:

$$m_z^{c_y} = \frac{\Delta m_z}{\Delta c_y} = \frac{m_{z2} - m_{z1}}{\Delta c_y} \quad (8)$$

где $\Delta c_y = c_{y2} - c_{y1}$ – изменение коэффициента плавучести, приходящейся на изменение угла буксировки на 1° .

При $m_z^\alpha < 0$ ($m_z^{c_y} < 0$), условие статической устойчивости соблюдается и восстанавливающий момент будет компенсировать изменение угла буксировки.

В то же время, увеличение скорости буксировки, дополнительно на значительной глубине приведёт к уменьшению запаса продольной устойчивости вследствие перемещения центра давления ближе к фокусу блока плавучести. Данное обстоятельство компенсирует движитель, установленный в задней части блока плавучести.

При возникновении возмущающего момента относительно центра масс ННП, вектор приобретает вращательную скорость ω_z , которая является знакопеременной:

$$\pm \Delta \omega_d = k_{oc} \cdot \omega_z, \quad (9)$$

где k_{oc} – коэффициент обратной связи по угловой скорости.

Боковое равновесие достигается нулевым значением проекцией сил, действующих на ННП, которые в свою очередь складываются из поперечного и буксировочного равновесия.

Зададим значения координат левого и правого борта ННП при нулевой плавучести в уравнении (10) в виде:

$$\sum Y = Y_{пр} + Y_{лв} = 0, \quad (10)$$

или моментов в уравнении (11) в виде:

$$\sum M_x = Y_{лв} z_{лв} - Y_{пр} z_{пр} = 0. \quad (11)$$

Буксировочное равновесие УМБК достигается равенством нулю суммы сил и проекций на ось OX :

$$\sum X = P_1 + P_2 - x_{лв} - x_{пр} = 0, \quad (12)$$

и соответственно моментов:

$$\sum M_y = P_1 z_1 - P_2 z_3 - x_{лв} z_{лв} - x_{пр} z_{пр} = 0. \quad (13)$$

Очевидным условием выполнения условий является равенство сил и моментов:

$$P_1 + P_2 = x_{лв} + x_{пр}, P_1 z_1 = P_2 z_2, x_{лв} z_{лв} = x_{пр} z_{пр}. \quad (14)$$

Боковую устойчивость можно определить в ходе аэротрубного эксперимента с исследованием зависимостей $m_x = f(\beta)$ и $m_y = f(\beta)$ моментов крена и рыскания от угла скольжения. Учитывая угол буксировки, компенсацию (демпфирование) разворачивающего момента, можно обеспечить гидродинамическими наделками в задней части ННП, вид и форма которых устанавливается в ходе серии натурных экспериментов.

Статическая устойчивость по крену количественно определяется коэффициентом момента рыскания

$$m_y = \frac{M_y}{S \frac{\rho v^2}{2} L} \quad (15)$$

где M_y – момент рыскания ННП, который определяется, чаще экспериментально, учитывая размещение бортового оборудования и сопротивления потоку.

Часто, при компоновке телеуправляемых необитаемых аппаратов, что в принципе может быть использовано в отношении и ННП, используют оценочное соотношение:

$$\gamma = \frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{m_y^\beta}{m_x^\beta}. \quad (16)$$

Из соотношения полученных на практике эта величина обычно выбирается равная 1.5.

В тоже время значительные по объёму исследования проводились в интересах различных проектов, связанных с созданием техники освоения мирового океана. Полученные результаты дают возможность выполнить сравнительный анализ математической модели оценки статической устойчивости с исследованиями обтекаемых профилей в аэродинамических трубах и опытовых бассейнах [5].

Для ННП круглого сечения [5] применим коэффициент удлинения:

$$\lambda = \frac{L}{d}, \quad (17)$$

где L – длина ННП, d – диаметр. Критерий соответствия натурного эксперимента практики составляет $\lambda \cong 7$, при котором не наблюдается отрыв вихрей от корпуса УМБК.

Для каждого λ , зависимость c_x (лобового сопротивления) можно записать:

$$f(\lambda) = \frac{c_x \cdot \lambda}{c_x \cdot \lambda_{=7}}. \quad (18)$$

Подводные исследовательские аппараты можно разделить на четыре группы, в зависимости от обтекаемости и наличия плохообтекаемых элементов в конструкции. В настоящей работе, рассматривается случай для $\lambda_{=6,7}$ значение остаточного сопротивления c_r (сопротивления формы) составляет величину $c_r(\lambda_{=6}) = 0.6$ и $c_r(\lambda_{=7}) = 0.3$, т.е. с увеличением длины, сопротивление формы будет уменьшаться, при этом $\lambda_{=6,7} = 0.79$.

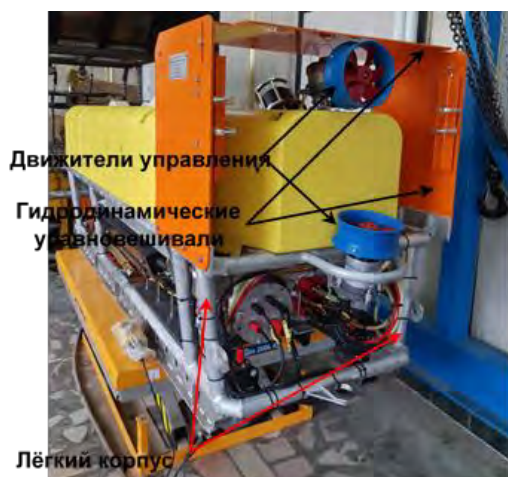
Увеличение габаритов связаны с необходимостью получения устойчивости по запасу плавучести, а лобовое сопротивление связано с параметрами угла буксировочной линии c_x . Однако при разработке ННП с плохообтекаемыми формами необходимо применение стабилизаторов для улучшения параметров продольной и поперечной устойчивости.

При рассмотрении компоновки УМБК представленной на рисунках 1 и 2. В задней части установлены надделки в виде горизонтальных и вертикальных стабилизаторов. При неизменном размере L и коэффициента c_x , увеличится значение коэффициентов c_y , c_z , что в свою очередь вызовет увеличение моментов M_y , и M_z относительно центра масс УМБК.

Аналитически - это выражается через увеличение остаточного сопротивления c_r , и означает, что при существующей компоновке можно получить сопротивление $c_r(\lambda_{=5}) = 1.6$, или $c_r(\lambda_{=4}) = 3.5$. Такой подход с одной стороны уменьшает момент рыскания и изменения дифферента, с другой стороны несколько возрастает сопротивление буксировки.



Рис. 1. Носитель нейтральной плавучести буксируемого геофизического комплекса УМБК



Гак для буксировки

а) буксируемый геофизический комплекс (задняя проекция)

б) буксируемый геофизический комплекс (вид спереди)

Рис. 2. Элементы ННП буксируемого геофизического комплекса УМБК

Результаты

Рассмотренные выше соотношения, полученные из практики для УМБК с параметрами:

- габариты – 2400 x 3600 x 2000 мм;
- дедейт – 4000 кг;
- плавучесть – 0 (до 40 кН).

Скоростная динамика вытекает из качества съёмки донной поверхности гидроакустическими сенсорами (альтиметрами), средствами видеосъёмки и т.д. составляет величину от 1,5 до 6 узлов.

Компоновка и размещение системы управления ННП показаны на рисунках 1 и 2.

В полунатурном эксперименте установлено, что при 6 узлах буксировки с угол буксирной линии составит величину 14,3 градуса, при 3 узлах – 29 градусов и при 1,5 узлах – 51 градус. Вычисленные значения экстраполяции для выбранной компоновки УМБК позволили получить уравнение:

$$\alpha^0(v_{\text{бук}}) = 2.17037v^2 - 24.4333v + 82.76667 \quad (19)$$

график приведён на рисунке 3.

Особенности применения ННП должны обеспечивать дифферент от 0^0 до 2^0 , что достигается углами гидродинамических пластин в задней части блока плавучести.

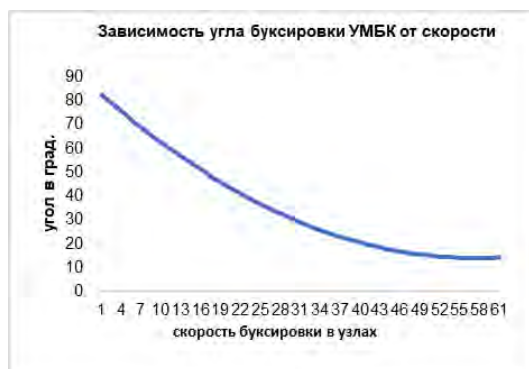


Рис. 3. Зависимость угла буксировочной линии от скорости буксировки УМБК

Принципы компоновки рассмотренные выше должны также учитывать применение активных элементов - двигателей, расположенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Оценим возможные количественные показатели маневрирования носителя нейтральной плавучести (ННП) относительно гаража-заглубителя (ГЗ) с помощью активных органов управления аппарата.

Для определения необходимых управляющих усилий и динамичности переходных процессов были проведены две серии оценочных расчётов:

– расчёт необходимых заглубляющих и отводящих сил на ННП для достижения некоторых заданных поперечных отстояний от ГЗ в стационарном состоянии системы (статика гибкой нити);

– расчёт времени и траектории движения при переходе на новый попутный галс (переход на новый горизонт не рассматривался ввиду менее жёстких требований и возможности его выполнения и другими средствами: изменением длины основного буксирного кабель-троса и скорости судна).

Оценочные расчёты траектории лагового движения ННП относительно ГЗ выполнены при условии постоянства отводящей силы, с учётом лагового сопротивления и соответствующей присоединённой массы буксируемого носителя. Гидродинамические моменты вязкостной и инерционной природы, действующие на аппарат, не учитывались, предполагается их минимизация условиями подвески буксируемого носителя. Не принимались во внимание также инерционные силы, действующие на кабель-трос, в связи с их малостью по сравнению с инерционностью буксируемого носителя.

Кроме того, необходимо подобные расчёты провести в динамической постановке, т. е. оценить, как чутко будет реагировать ННП на создаваемые активными элементами воздействия.

Расчёты динамики поведения ННП проведены для диапазона скоростей буксировки от 1 до 3 уз, длины КТ 75 м (диаметром 15 мм и весом в воде 1,2 Н/м) при

заглублении ходового конца относительно коренного, равном 20 м, и массе ННП 825 кг.

Пример результатов одного из тестовых расчётов параметров лагового движения (перемещения, скорости и ускорения) в зависимости от времени для скорости буксировки 2 узла и отводящей силы 126 Н (последний столбец таблицы 1) представлен на рисунке 4. Видно, что лаговое перемещение представляет собой быстро затухающий колебательный процесс вокруг стационарного положения ПА на расстоянии 20 м от траектории движения ГЗ, что совпадает с данными таблицы 1 [7].

Таблица 1
Результаты расчётов усилий, необходимых для отведения ННП в сторону от направления буксировки

Скорость буксировки	V	м/с	1,0			
Боковое смещение ННП	Z	м	0,0	10,0	15,0	20,0
Снос ННП вниз по потоку	X	м	72,2	71,5	70,6	69,2
Заглубляющая сила	T _y	Н	49,0	55,0	63,00	73,0
Отводящая сила	T _z	Н	0,0	52,5	86,0	126,0

Выход на заданный галс в коридор шириной 1 м может быть выполнен за 1,5-2,0 минуты. На практике колебания могут быть нивелированы применением соответствующего закона управления отводящей силой.

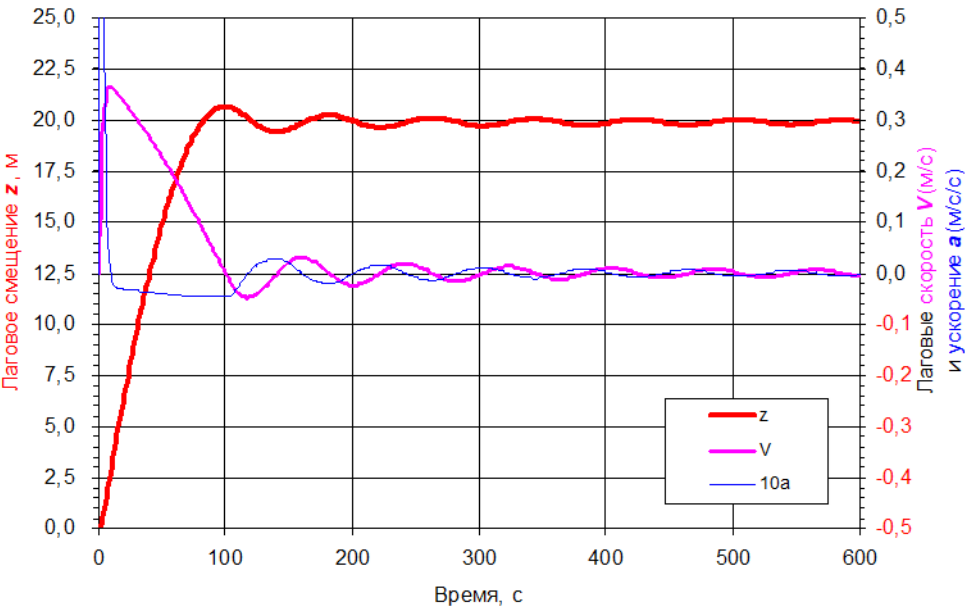


Рис. 4. Зависимость параметров лагового движения ПА во времени

Результаты основных расчётов в виде траектории движения ННП представлены на рисунках 5-7. Очевидно, что с увеличением скорости буксировки и снижением отводящей силы манёвренность ННП уменьшается. На самой малой скорости (1 уз) и при максимальной отводящей силе (200 Н) величина лагового смещения ПА относительно ГЗ может достигать 60 м. На перестроение потребуется около 3 минут. Вдвое меньшее расстояние может быть достигнуто за 1 минуту. А при скорости 2 уз такое смещение — 28 м — является максимально достижимым, затрачено на манёвр будет около 1,5 минут.

С учётом того, что начальная фаза траектории ПА почти прямолинейна, интересным показателем манёвренности в данной ситуации может быть угол θ

отклонения траектории ПА от направления буксировки, показанный на рисунке 4.8. Он позволяет судить о соотношении маршевого и лагового перемещений. Зависимость этого угла от скорости буксировки и отводящей силы представлена на рисунке 8. В рассмотренном диапазоне исходных данных максимальный угол может составлять 40-45°.

На рисунке 9 показана начальная фаза движения ПА для случая, представленного на рисунке 7 (те же зависимости, но в другом масштабе). Движение становится устойчивым, близким к прямолинейному, начиная примерно с 3-й секунды. К этому времени ПА проходит около 40 см. За первую секунду он сдвигается всего на 5 см, т.е. наблюдается нелинейность, связанная с инерционностью аппарата.

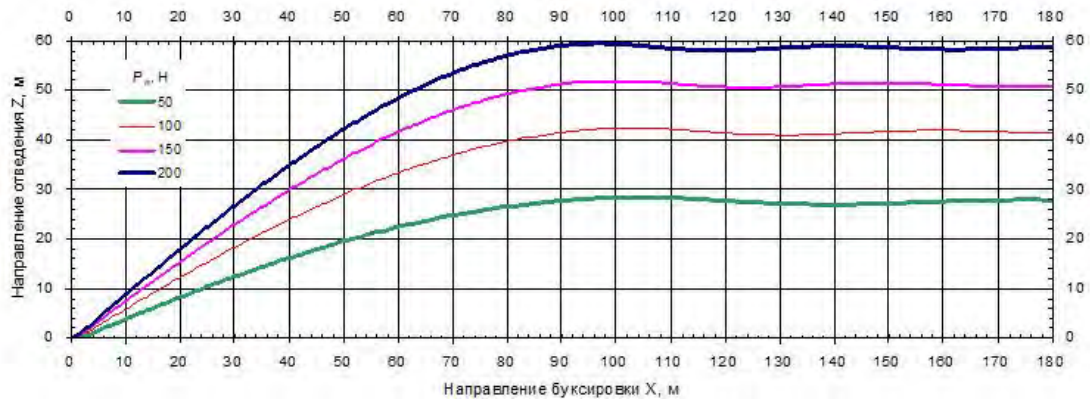


Рис. 5. Траектория ПА при скорости буксировки 0,5 м/с

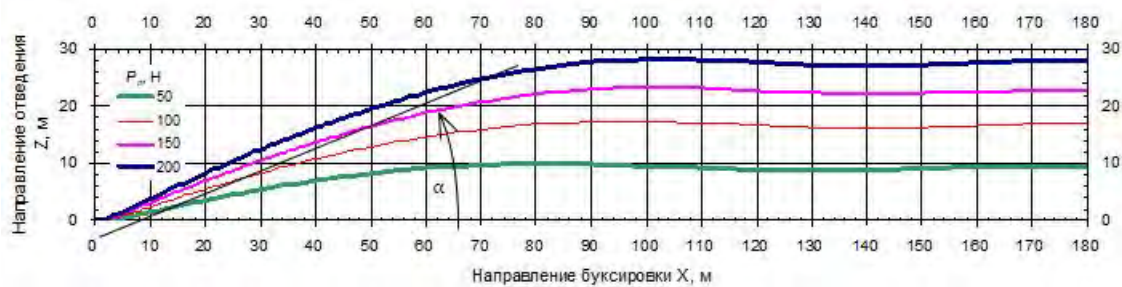


Рис. 6. Траектория ПА при скорости буксировки 1,0 м/с

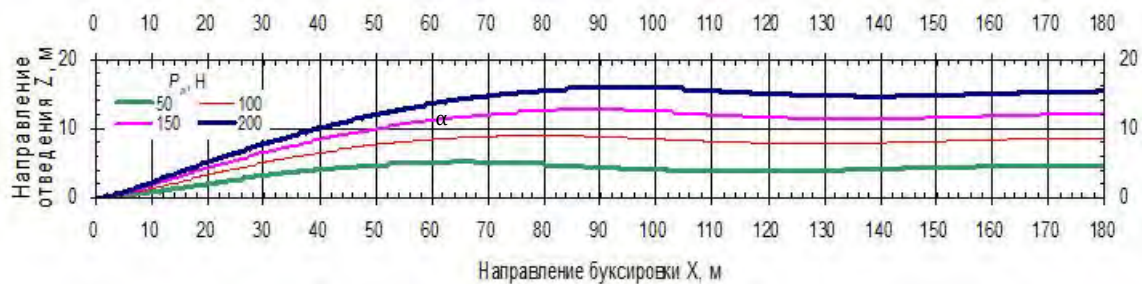


Рис. 7. Траектория ПА при скорости буксировки 1,5 м/с

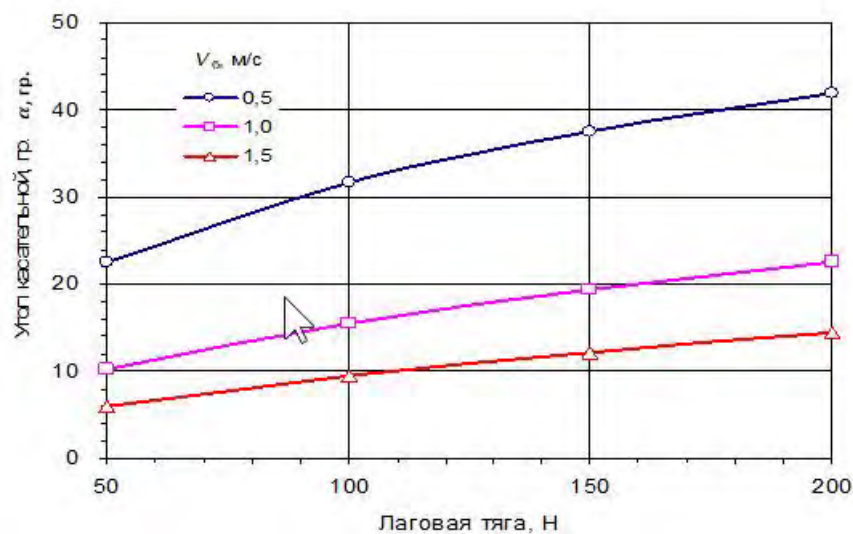


Рис. 8. Зависимость угла наклона касательной к траектории движения ПА от скорости буксировки и величины отводящей силы

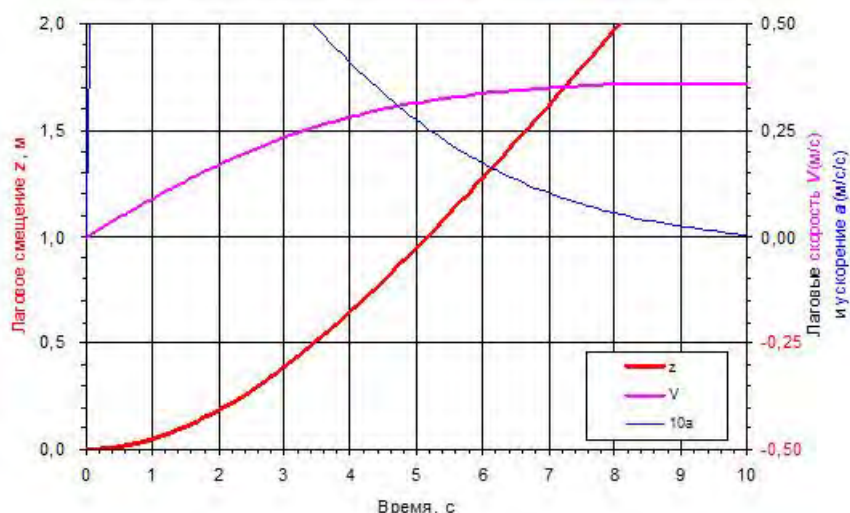


Рис.9. Зависимость параметров лагового движения ПА во времени (разгонный участок)

Заключение

Исследование показателей статической и динамической устойчивости с учётом энергоэффективной универсального многоцелевого буксируемого комплекса позволяют определить:

- технические параметры комплекса обеспечивающих возможность установки на ПА вертикальных и лаговых гребных движителей, позволяющих на скоростях буксировки от 1 до 3 уз совершать переход на попутные галсы, отстоящие от траектории ГЗ на 60 м, соответственно; заглубление ННП относительно ГЗ может составлять при этом 20-40 м;

- длительность переходных процессов при максимальном отведении, в рассмотренном примере, может достигать 3 минут;

- угол между начальным участком траектории ПА, переходящего на попутный галс, и направлением буксировки, в рассматриваемой компоновке УМБК достигает 40-45°.

- низкая функциональная эффективность процедуры маневрирования в плане с точки зрения отслеживания протяжённых объектов.

- показатели энергопотребления при значительном отклонении от траектории буксировки ННП. Следует ожидать, что величина генерируемых упоров для придания носителю высокой динамичности возрастёт, что в свою очередь повлечёт повышение энергопотребления.

Условия проведения съёмки одновременно различными методами, например, батиметрическая съёмка многолучевым эхолотом (МЛЭ), сонарная съёмка гидролокатором бокового обзора высокой частоты (ГБО ВЧ) и видеопрофилирование, требует одновременно разной дистанции до

грунта (альтитуды) оборудования расположенного как на ГЗ, так и на ННП: от 3 до 8 м - для телекамер и ГБО ВЧ, от 30 до 40 м - для МЛЭ.

Размещение оборудования как на ННП, так и на ГЗ позволяет решить эту задачу при условии, что ННП сможет маневрировать по глубине относительно ГЗ. Поэтому в составе ННП необходимо предусмотреть средства управления глубиной.

С учётом того, что ННП для аварийного всплытия должен обладать положительной плавучестью 10-15 кгс, носовое подруливающее устройство, состоящее из двух движителей, сможет создавать заглубляющую тягу около 40 кгс, кормовое — около 20 кгс.

Достижимые характеристики для рассматриваемой компоновки ННП позволят:

- заглубляться относительно ГЗ на 30 и более метров при скоростях буксировки до 3 узлов включительно;

- при плавном изменении рельефа дна поддерживать постоянную алтитуду ННП без изменения глубины буксировки ГЗ;

- огibtать единичные препятствия на грунте;

- стабилизировать дифферент на ходу;

- управлять высотным положением, дифферентом и креном при входе в ГЗ.

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.

Литература

1. Рулевский В. М., Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Кулешова Е. О., Шандаров С. М. и Васильева Ю. З. Математическая модель системы электроснабжения автономного объекта с передачей электроэнергии переменного тока по кабельному канату. В серии конференций IOP: Материаловедение и инженерия 2017, Том 177, № 1, стр. 012073.
2. Зарубежные самоходные необитаемые морские аппараты. А. А. Тарасенко [и др.]. СПб.: АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», 2016. - 300 с.
3. Подводные аппараты для геологических исследований под. ред. А. М. Игнатова. Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. 92 с.
4. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник. Л.: Судостроение, 1983.
5. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Судостроение. 1975. Т.2. С.174.
6. Данцевич И.М., Лютикова М.Н. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации и управления телеуправляемыми необитаемыми комплексами. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 161—170. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.020
7. 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
8. Гайкович, А. И., Никитин, Н. В., Сулов, А. Н., & Хань, Б. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана. Морские интеллектуальные технологии. 2019, С. 80.
9. Данцевич И.М. Совершенствование разработки малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 147—152.
10. Овчинников К.Д., Синишин А.А., Белая А.Б., Рыжов В.А. Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера. 2022. № 3 часть 1, С. 46—51
11. Дергилев А.И., Жук С.С., Аванесова Т.П. Реализация системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 16—21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.001
12. Дергилев В. А., Жук С. С., Аванесова Т. П. Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 11—16. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.001

References

1. Rulevsky V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B., Kuleshova E.O., Shandarov S.M. and Vasilyeva Yu. Z. Mathematical model of the power supply system of an autonomous object with the transmission of alternating current electric energy via a cable rope. In the IOP conference series: Materials Science and Engineering 2017, Volume 177, No. 1, p. 012073.
2. Foreign self-propelled uninhabited marine vehicles. A. A. Tarasenko [et al.]. St. Petersburg: JSC "St. Petersburg Marine Bureau of Mechanical Engineering" Malakhit, "2016. - 300 s.
3. Underwater vehicles for geological research under. ed. A. M. Ignatov. Gelendzhik: PO Yuzhmorgeologiya, 1990. 92 p.
4. Devnin S.I. Aerohydromechanics of poorly flowing structures: Reference book. L.: Shipbuilding, 1983.
5. Blagoveshchensky S. N., Kholodilin A. N. Reference book on the statics and dynamics of the ship. Shipbuilding. 1975. T.2. S.174.
6. Dantsevich IM, Lyutikova MN Formalization and setting of problems of system analysis, optimization and management of remote-controlled uninhabited complexes. Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 4 part 1, S. 161 - 170. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.020
7. Lyutikova M.N., Buzenkov I.I., Khaleeva E.P., Malakhov S.O., Tsepordey O.V. Combination of systems for zoning universal multi-purpose towed geophysical complexes with carrier vessel systems, Marine intelligent technologies. 2023. No. 1 part 1, S. 191 - 199. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.024
8. Gaikovich, A.I., Nikitin, N.V., Suslov, A.N., & Han. Analytical method for determining the power capacity of a catamaran power plant. Marine Intelligent Technologies, 2019, p. 80
9. Dantsevich I.M. Improving the development of a small-sized remote-controlled unmanned underwater vehicle of a hybrid arrangement. Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 3 part 1, S. 147 - 152.
10. Ovchinnikov KD, Sinishin AA, Belaya AB, Ryzhov V.A. Study of the influence of steering system parameters on the controllability characteristics of a wave glider. 2022. No. 3 Part 1, S. 46 - 51
11. Dergilev A.I., Zhuk S.S., Avanesova T.P. Implementation of a system for filtering initial data in the technology of high-precision positioning of the hull of a sea vessel in space, Marine intelligence-toile technologies. 2023. No. 4 part 1, S. 16 - 21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.001
12. Dergilev V. A., Zhuk S. S., Avanesova T. P. Analysis of the economic feasibility of using the concept of an autonomous navigation system in the port. Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 3 part 1, S. 11 - 16. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.001

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

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D. (Eng), Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.03.2024

Научная статья

УДК 519.711: 004.272.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.024>

Интеллектуальная система управления траекторным движением морского подвижного объекта и классификации объектов

Магомедов А.И.¹ AG_Magomedov94@mail.ru¹Дагестанский государственный технический университет

Аннотация. Актуальность вопроса разработки интеллектуальных систем управления и классификации динамических объектов продиктована тем, что в области применения систем искусственного интеллекта появился большой класс сложных объектов требующих управления в реальном времени, функционирующих в проблемной (неопределенной) среде. Например, морские подвижные объекты (в том числе беспилотные), беспилотные летательные аппараты палубного базирования и т.п. Построение систем управления указанными объектами с использованием классической теории управления не позволяет получить требуемое качество управления в реальном времени. В связи с этим в работе приведены основные принципы построения интеллектуальных систем управления сложными динамическими процессами и классификации наблюдаемых им объектов с использованием нечёткого способа представления знаний. Рассмотрены вопросы построения и проблемы реализации логико-лингвистических (нечетких) моделей принятия управленческих решений в системах искусственного интеллекта, функционирующих в реальном масштабе времени. Проведён анализ современных способов обработки нечёткой информации и средств реализации нечётких алгоритмов управления. Отмечено, что несоответствие структур современных вычислительных устройств параллельному характеру обработки нечёткой информации в процессе реализации нечётких алгоритмов управления не позволяет в полной мере использовать возможности построения и реализации логико-лингвистических моделей управления сложными процессами и классификации динамических объектов в реальном масштабе времени. Предложены обобщённые структурные элементы однородных процессоров, на базе которых созданы трёхмерные ассоциативные модули специализированного сопроцессора поразрядно-параллельного принципа действия, служащего для обработки знаний в процессе принятия решений, а также структуру интеллектуальной системы управления траекторным движением морского подвижного объекта и классификации объектов на основе нечеткой базы знаний.

Ключевые слова: нечёткая модель, интеллектуальная система, морские подвижные объекты, траектория, ассоциативное запоминающее устройство, функция принадлежности, нечёткие правила, нечёткая база знаний, нечеткие алгоритмы управления.

Для цитирования: Магомедов А.И. Интеллектуальная система управления траекторным движением морского подвижного объекта и классификации объектов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 208—218. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.024

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.024>

Intelligent system for marine mobile object trajectory motion control and object classification

Aligaji I. Magomedov¹, AG_Magomedov94@mail.ru¹Dagestan State Technical University, Republic of Dagestan, Makhachkala.

Abstract. Annotation. The relevance of the issue of developing intelligent control systems and classification of dynamic objects is dictated by the fact that in the field of application of artificial intelligence systems a large class of complex objects that require real-time control and operate in a problematic (uncertain) environment has appeared. For example, marine mobile objects (including unmanned ones), deck-based unmanned aerial vehicles, etc. The construction of control systems for these objects using classical control theory does not allow obtaining the required quality of control in real time. In this regard, the paper presents the basic principles of constructing intelligent control systems for complex dynamic processes and classifying objects observed by them using a fuzzy method of representing knowledge. The issues of construction and problems of implementation of logical-linguistic (fuzzy) models of management decision-making in artificial intelligence systems operating in real time are considered. An analysis of modern methods of processing fuzzy information and means of implementing fuzzy control algorithms has been carried out. It is noted that the discrepancy between the structures of modern computing devices and the parallel nature of processing fuzzy information in the process of implementing fuzzy control algorithms does not allow full use of the possibilities of constructing and implementing logical-linguistic models for controlling complex processes and classifying dynamic objects in real time. Generalized structural elements of homogeneous processors are proposed, on the basis of which three-dimensional associative modules of a specialized coprocessor of a bit-parallel operating principle are created, which serves for processing knowledge in the decision-making process, as well as the structure of an intelligent system for controlling the trajectory movement of a marine mobile object and classifying objects based on a fuzzy knowledge base.

Key words: fuzzy model, intelligent system, marine moving objects, trajectory, associative memory device, membership function, fuzzy rules, fuzzy knowledge base, fuzzy control algorithms.

For citation: Aligaji I. Magomedov. Intelligent system for marine mobile object trajectory motion control and object classification. Marine intelligent technologies. 2024. № 2 part 1, P. 208—218. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.024

Введение

Интенсивное развитие научно-практического направления в области информационных технологий и средств вычислительной техники, а также по созданию интеллектуальных систем управления различного назначения, ставит перед исследователями, работающими в данной предметной области, новую задачу, связанную с построением логико-лингвистических моделей принятия решений в интеллектуальных системах управления (ИСУ) и/или классификацией наблюдаемых объектов. Решение данной задачи основано на том, что функционирование создаваемой системы описывается опытным оператором управляемого процесса на естественном языке в терминах лингвистических переменных [1,2] и представляет собой интеллектуальный регулятор управления или классификатор объектов по заданным критериям, опирающийся на модель в виде заданной базы знаний, которая является результатом логико-лингвистического описания объекта управления.

Применение теории нечётких множеств (логико-лингвистического подхода) [1-3] в ИСУ является обоснованным, когда динамика управляемого процесса описывается сложными уравнениями и/или процесс недостаточно определён для анализа, посредством классической теории управления, так как приводит к сложным вычислительным процедурам, которые практически не поддаются анализу в реальном масштабе времени. К таким сложным объектам управления относятся и морские подвижные объекты (МПО) различного назначения, которые функционируют в априори неопределённой среде.

Многие авторы [4-11] приводят примеры использования теории нечётких алгоритмов управления (НАУ) для построения регуляторов, которые показывают, что нечёткие системы управления позволяют получить достаточное для практического применения качество управления с меньшими вычислительными затратами, чем классическая теория управления при отсутствии математической модели управляемого процесса. Однако проблема аппаратной реализации таких алгоритмов на сегодняшний день остаётся открытой.

1. Проблемы построения интеллектуальных систем управления неопределёнными объектами

Положительные результаты применения нечёткого подхода к решению сложных задач, в том числе и задачи управления траекторным движением МПО, порождают ряд проблем, связанных с реализацией нечётких алгоритмов управления. К ним относятся:

- разработка принципов построения интеллектуальных систем, базирующихся на нечётких (логико-лингвистических) моделях управляемого процесса и классификации участвующих в процессе объектов;

- разработка и исследование логико-лингвистической модели принятия управленческих решений в интеллектуальных системах управления траекторным движением МПО при различных внешних воздействиях;

- разработка аппаратной поддержки математического и алгоритмического обеспечения нечётких систем управления неопределёнными динамическими процессами и систем классификации, т.е. создание нечётких микроконтроллеров и/или нечётких специализированных процессоров обработки нечёткой информации, характерной особенностью которой является возможность их параллельной обработки, а также элементная база их построения;
- разработка новых инженерных методов и средств создания и настройки нечётких цифровых регуляторов для ИСУ.

Решению указанных выше проблем и посвящена данная работа.

2. Принципы построения интеллектуальных систем управления и классификации наблюдаемых объектов

2.1. Принцип ситуационного управления. Идея данного принципа построения ИСУ состоит в том, что опираясь на знание и опыт оператора, множество допустимых состояний управляемого процесса (объекта) представляется как классы ω_k , ($k=1, \dots, K$) нечётких эталонных ситуаций. При этом допускается, что каждый класс может содержать некоторое число эталонных ситуаций S^i , ($i=1, \dots, L$), которым соответствует одно заранее известное эффективное решение. Данное решение заключается в определении степени близости (по принципу максимальной близости или минимального отличия) реальной ситуации к тому или иному классу эталонных ситуаций, т.е. в определении степени принадлежности $\mu(S^i, \omega_k)$ текущей нечётко представленной ситуации к эталонным ситуациям, для которых заранее известны решения.

Из сказанного следует, что реализацию нечётких алгоритмов управления средствами вычислительной техники можно рассматривать как задачу классификации и интерпретировать как структурный подход к распознаванию образов.

2.2. Принцип открытости архитектуры и самообучения системы. Этот принцип предполагает, что сама ИСУ и база знаний, заложенная в систему, должны быть построены по модульному принципу и должны допускать автоматическую адаптацию к требованиям решаемой задачи на основе полученной информации (принцип 2.1), т.е. в систему должны быть заложены алгоритмы самонастройки и самообучения на основе знаний об управляемом процессе.

При этом база знаний может содержать и общие сведения, которые могут быть использованы для решения всех задач, и текущие знания о данном объекте управления, которые предназначены для адаптации (самонастройки и/или адаптации) системы к требованиям решаемой задачи. Разделение базы знаний на две части предполагает

наличие в ИСУ блока самообучения и самонастройки с процедурами принятия управленческих решений и оценки их эффективности в процессе функционирования, а также формирования новых знаний об управляемом процессе с целью повышения качества управления.

2.3. Принцип автономности. Данный принцип предполагает, что ИСУ способна автоматически определять текущее состояние объекта и принимать управленческие решения, связанные с управляемым объектом, функционирующим в неопределённой среде и при возникновении априори неопределённых ситуаций.

2.4. Принцип полноты описаний ситуаций. Заключается в том, что в нечёткой модели управления приведено описание всех возможных (допустимых) ситуаций с соответствующими управляющими воздействиями (см. принцип 2.1).

Задачей блока принятия решений и блока оценки качества управления по заданному критерию является определение управляющего воздействия. Если текущая ситуация имеет степень близости, равную более 0,5, с некоторой эталонной ситуацией, то для определения реального управляющего воздействия можно применить метод Мамдани или другие известные методы определения управляющего воздействия.

При отсутствии близкой ситуации блок дополнения и оценки знаний с блоком самообучения определяет наиболее подходящее управляющее воздействие методом проб и ошибок, а также оценки, и сохраняет его значения.

2.5. Принцип обеспеченности.

ИСУ представляет собой совокупность информационного, программного, математического, алгоритмического, и аппаратного обеспечения, которые позволяют принимать управленческие решения в процессе управления сложными объектами, функционирующими в априори неопределённых средах.

Информационное обеспечение. Создание ИСУ без своевременной и достоверной информации о внешней среде функционирования управляемого объекта и о его состоянии невозможно, так как ИСУ должна непрерывно получать полную информацию о состоянии самого объекта в реальном масштабе времени и о внешней среде, с целью извлечения знаний для эффективного функционирования системы в целом.

Источниками информации в ИСУ должны быть система высокоточных датчиков различного вида с элементами искусственного интеллекта и инженер знаний, для формализации практического опыта и знаний оператора процесса.

Математическое обеспечение ИСУ должно иметь в своём составе модели объектов управления или классификации, алгоритмы принятия управленческих решений, а также алгоритмы самообучения системы на основе полученной от датчиков информации о внешней среде и функционировании управляемого объекта, а также самом процессе управления.

Алгоритмическое обеспечение представляет собой нечёткие правила принятия управленческих решений. Например, алгоритм Мамдани [6] в форме:

P_1 : если x есть A_1 и y есть B_1 , то u есть C_1 ,

P_2 : если x есть A_2 и y есть B_2 , то u есть C_2 ,

P_n : если x есть A_n и y есть B_n , то u есть C_n .

где: x – ошибка управления, $x \in X$; y – скорость изменения ошибки управления $y \in Y$; u – управляющее воздействие, $u \in U$; A_i , B_i и C_i – нечёткие множества, определённые на X , Y и Z с помощью функций принадлежности $\mu_{A_i}(x)$, $\mu_{B_i}(y)$ и $\mu_{C_i}(u)$.

Преимущество использования таких правил заключается в том, что оператор управляемого процесса может описать алгоритмы на близком к естественному языку, что упрощает восприятие правил, их разработку и изменение.

Алгоритмическое обеспечение также содержит алгоритмы сбора, накопления и оценки знаний об управляемом объекте и/или процессе с целью повышения качества управления.

Программное обеспечение – это набор программ оценки и формирования оптимальных управленческих решений, самообучения, сбора и обработки информации о состоянии объекта управления и среды его функционирования и других вспомогательных программ.

Аппаратное обеспечение ИСУ. В области аппаратного обеспечения систем обработки нечёткой информации достигнуты некоторые успехи [4, 12-16], однако их применение в ИСУ, базирующихся на нечётких моделях представления знаний, не эффективно, так как они не учитывают параллельный характер обработки нечёткой информации. В работах [4, 13-17] отмечено, что по своей природе нечёткие (логико-лингвистические) модели управления траекторным движением МПО представляют собой набор нечётких правил принятия решений, которые могут быть обработаны параллельно, что не свойственно современным универсальным вычислительным машинам. Анализ работ [4, 8-11] показывает, что вопросы аппаратной поддержки нечётких алгоритмов управления в ИСУ мало исследованы и требуют для своего решения создания специализированного класса вычислительных систем, ориентированных на параллельную обработку большого потока нечётко заданных данных. В какой-то степени этот пробел заполнен в работах Мелихова А.Н., Берштейна Л.С., Кокаева О.Г., Магомедова И.А., Тэрано Т., Асаи М. и других авторов, но он все ещё далёк от решения всех проблем обработки нечётко представленных знаний.

В работах [18, 19] рассмотрен нечёткий аналоговый процессор, в котором достигается скорость обработки логических правил до одного млн. в сек. Другой процессор, рассмотренный в этой же работе, построен с использованием цифровой и аналоговой технологий и достигает скорость обработки до 10 нечётких правил принятия управленческих решений.

Универсальный нечёткий регулятор FZ—3000/3010 фирмы Omron, используемый в системах управления станками с ЧПУ, приведён в работе [18]. Для проектирования нечётких процессоров на СБИС, на базе которых создаются нечёткие регуляторы, имеются специально разработанные автоматизированные рабочие места. Отмечено, что по качеству управления нечёткие регуляторы превосходят классические ПИД-регуляторы.

Работы по созданию аппаратных средств обработки нечёткой информации ведутся во многих

странах. Так, например, в [3] рассмотрена архитектура нечёткого компьютера японских ученых, предназначенного для параллельной аппаратно-программной обработки нечёткой информации. При этом авторы данной работы «убеждены, что достоинства нечёткой обработки не будут очевидны до тех пор, пока она не будет реализована аппаратно, а не программно».

Другой подход к решению проблемы снижения времени реализации НАУ связан с интеграцией некоторых специальных fuzzy-команд в микроконтроллере и с разработкой специальных сопроцессоров, что позволит увеличить скорость обработки нечёткой информации в несколько раз.

Отметим, что в 80-х годах прошлого столетия в области аппаратной реализации НАУ велись работы в Ленинграде, Таганроге, Москве и других научных центрах [13,15, 20]. Так, в работах [13,15] предложены нечёткие процессоры управления параллельно-порядного действия на основе ассоциативных запоминающих устройств (АЗУ), что позволит совмещать режимы хранения и обработки нечёткой информации и существенно повысить скорость принятия решений.

Группой отечественных специалистов под руководством профессора А.Н. Мелихова [12,20] также велись работы по созданию специализированных аппаратных средств для реализации НАУ, где в рамках этих исследований были разработаны алгоритмы преобразования и представления нечёткой информации в форме, удобном для ее обработки на нечётких процессорах управления, а также разработаны методики построения процессоров, способных распознавать нечётко заданные ситуации.

В конце 90-х годов был создан процессор FuzCor 2.0 [12, 20] для реализации алгоритмов композиционного и ситуационного способов принятия нечётких управленческих решений, в основу которого положена конвейерная архитектура с векторным процессором, что частично решает вопрос параллельной реализации НАУ.

В работе [22] решается задача управления движением телеуправляемого беспилотного подводного аппарата с борта судна-носителя, где применены нечёткие алгоритмы управления с нейросетевым обучением регулятора, а в статье [23] рассмотрены вопросы управления двумя объектами посредством нечёткого ПИД-регулятора, где отмечено, что качество управления не хуже, чем при применении классического регулятора. В [24] разработаны и исследуются нечёткие модели управления скоростью судна, приведены результаты математического моделирования, которые показывают, что нечёткая модель обеспечивает достаточное для практики качество управления. Аналогичные исследования имеются и в статье [25], посвящённой разработке нечётких регуляторов управления курсом судна при случайных внешних воздействиях. Во всех указанных работах нечёткие алгоритмы управления реализованы программным способом, что не позволяет учитывать параллельных характер обработки нечёткой информации и применять их для управления неопределёнными объектами в реальном времени.

В какой-то мере этот пробел восполнен в работах [26-27]. В [26] повышение производительности

обработки нечёткой информации достигается за счёт включения в состав управляющего процессора блока для нечётких вычислений, что позволит обрабатывать команд и данные параллельно, а в [27] предложен подход обработки нечёткой информации, основанный на параллельных вычислителях, что приводит к снижению реакции нечёткого регулятора управления летательными аппаратами на изменение параметров управляемого объекта.

Таким образом, анализ аппаратно-программных средств построения ИСУ показывает, что реализация НАУ производится 3 способами: 1) программно на микроконтроллерах архитектуры SISD (Single Instruction Single Data - одиночный поток команд и одиночный поток данных), что не обеспечивает параллельную обработку нечёткой информации из-за последовательного характера работы; 2) на гибридных цифро-аналоговых процессорах, где возникает проблема преобразования «аналог-цифра» и наоборот, хотя по быстродействию имеются хорошие результаты; 3) на сопроцессорах, ориентированных на последовательную обработку нечёткой информации, что также не обеспечивает параллельную реализацию НАУ.

В связи сказанным, в работе исследуются, логико-лингвистические модели принятия эффективных управленческих решений неопределёнными динамическими объектами, которые могут быть использованы в интеллектуальных системах управления указанными объектами, где база знаний представлена в виде НАУ, а также вопросы аппаратной реализации нечётких алгоритмов управления в реальном масштабе времени на сопроцессоре параллельно-порядного принципа действия, ориентированного на выполнение массовых операции поиска $\max$ и/или $\min$ числа из массива чисел. Именно эти операции составляет более 90% из всех операций обработки нечёткой информации.

3. Анализ алгоритма реализации логико-лингвистических моделей принятия решений

Вопросы построения и исследования НАУ траекторным движением МПО рассмотрены в работах [4-6], а вопросам структурной организации и аппаратной поддержки ИСУ МПО реального масштаба времени посвящена настоящая работа.

Решение проблемы построения ИСУ МПО на базе специализированного сопроцессора рассмотрим на примере ИСУ МПО, функционирующим в неопределённой среде, где база знаний представлена в виде нечеткой (логико-лингвистической) модели управления данным объектом.

Примером такой модели может служить модель управления траекторным движением МПО [4-6]. Аналогичные модели управления различными объектами и процессами, посредством нечётких алгоритмов, рассмотрены в работах [3, 7-9,17]. Во всех известных работах входные и выходные параметры определяются лингвистическими переменными [1], а качественное описание самого процесса управления траекторным движением МПО определено, как набор нечётких правил принятия управленческих решений вида [1-3,9]: «Если **отклонение** от заданной траектории δ **положительно большое** (ПБ) и, **скорость**

изменения отклонения δ' - отрицательно средняя (ОС), то угол перекладки руля α -положительно маленький (ПМ)», иначе перейти к следующему правилу....

Функции принадлежности значений лингвистических переменных **Отклонение, Скорость изменения отклонения и Угол перекладки руля** приведены на рисунках 1, 2, и 3.

Для построения указанных функций в MATLAB задавались следующие области изменения переменных: $\pm 60^\circ$; $\pm 0,3$ м/сек; ± 25 град. (рисунки 1-3) соответственно.

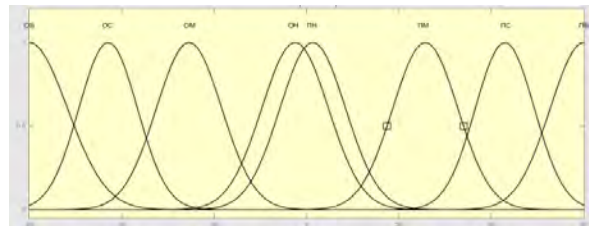


Рис. 1-Функции принадлежности лингвистической переменной «Отклонение»

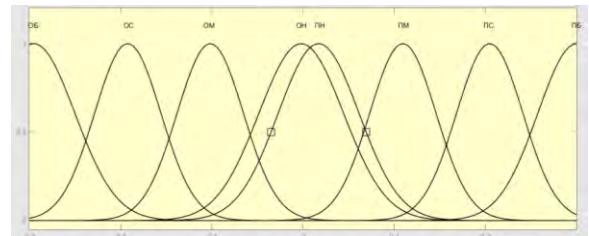


Рис. 2-Функции принадлежности лингвистической переменной «скорость изменения отклонения»

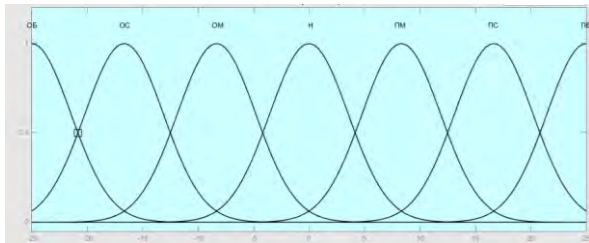


Рис. 3-Функции принадлежности лингвистической переменной «угол перекладки руля»

В таблицу сведены нечёткие правила принятия управленческих решений, сформированные опытным судоводителем с использованием приведённых выше значений лингвистических переменных.

Набор правил указанного вида называется нечёткой базой знаний и определяет взаимосвязи между входными /выходными переменными объекта управления.

Результат моделирования процесса управления МПО по заданной криволинейной траектории посредством приведённых в таблице НАУ представлены на рис. 4.

Таблица

База нечётких правил управления траекторным движением МПО

Скорость изменения отклонения	Отклонение							
	ОБ-отрицательно большое	ОС-отрицательно среднее	ОМ-отрицательно малое	ОН-отрицательно нулевое	ПН-положительно нулевое	ПМ-положительно малое	ПС-положительно среднее	ПБ-положительно большое
ОБ	ПБ	ПС	ПС	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ОН
ОС	ПБ	ПБ	ПС	ПС	ПС	ПМ	ОМ	ОС
ОМ	ПБ	ПС	ПМ	ПН	ПН	ОМ	ОС	ОС
ОН	ПБ	ПМ	ПМ	ПН	ОН	ОН	ОМ	ОБ
ПН	ПБ	ПМ	ПН	ПН	ОН	ОМ	ОМ	ОБ
ПМ	ПС	ПС	ПМ	ОН	ОН	ОМ	ОС	ОБ
ПС	ОС	ОМ	ОМ	ОС	ОС	ОС	ОС	ОБ
ПБ	ПН	ОМ	ОС	ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ

В качестве математической модели объекта управления в работе использована модель судна А.М. Басина [21], где гидродинамические коэффициенты модели судна менялись в пределах $\pm 25\%$ от расчётных, а скорость бокового течения V_t в пределах $\pm 0,5$ м/сек.

Как показывают результаты моделирования, такие правила могут быть применены для ИСУ различными сложными объектами, функционирующими в неопределённой среде или объектами, параметры которых меняются случайным образом во времени как у МПО. Универсальность и способность адаптации к изменяющимся условиям функционирования нечётких алгоритмов управления траекторным движением МПО объясняется тем, что для качественного управления не столь важно, отчего зависит знак и величина отклонения от заданной траектории, а также знак и скорость изменения значения отклонения, так как в нечёткой модели должны быть описаны все возможные ситуации (см. 2.5 принцип и таблицу) и соответствующие этим ситуациям управленческие решения.

В задачах управления траекторным движением МПО отношение между двумя входными лингвистическими переменными δ и δ' (отклонение от заданной траектории и скорость изменения отклонения соответственно) и одной выходной переменной α (угол перекладки руля) может быть выражено в терминах декартова произведения подмножеств А, В, С и представлено матрицей размерностью $I \times N \times K$ [4-6,10,12], где I, N, K - количество элементов в множествах X, Y, U соответственно. Такое представление отношений трёх нечётких переменных позволяет ответить на вопрос “Если отклонение δ есть A'_j , а скорость изменения отклонения δ' есть B'_m , то какое значение имеет управляющее воздействие α ?”, где A'_j и B'_m - нечёткие подмножества, полученные из А и В путём применения к ним различных операций или с использованием лингвистических переменных [1-6, 9].

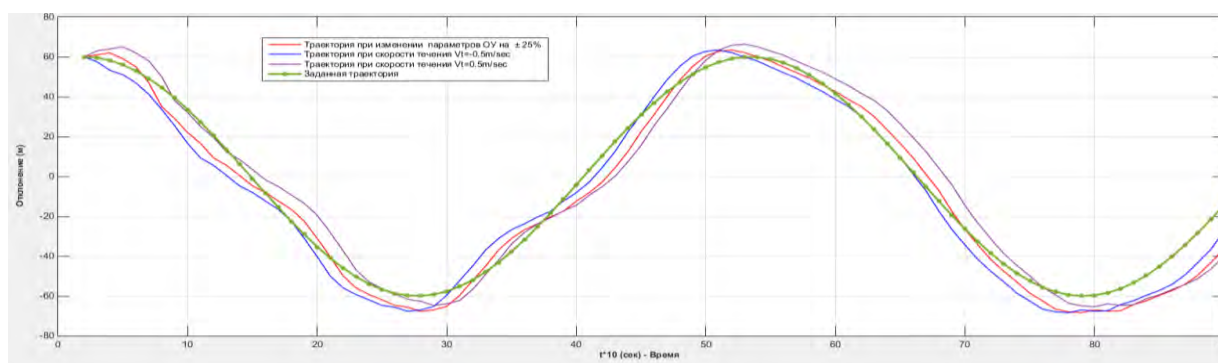


Рис. 4- Результаты математического моделирования процесса управления траекторным движением МПО при различных внешних воздействиях и изменении параметров объекта управления

Следовательно, если отношение трёх нечётких переменных $R=A \times B \times C$, то нечёткие текущие подмножества A'_j и B'_m индуцируют нечёткое подмножество C'_s , задаваемое посредством функции принадлежности:

$$\mu_{C'_s}(U_k) = \max_k \max_{in} \max_{ink} \{ \mu_{A'_j}(x_i), \mu_{B'_m}(y_n), \mu_R(\cdot) \}, \quad (1)$$

где $\mu_R(\cdot) = \mu_R(x_i, y_n, u_k)$: $X \times Y \times U \rightarrow 0,1$ - функции принадлежности нечёткого отношения $R=A \times B \times C$; $\mu_{A'_j}(x_i)$, $\mu_{B'_m}(y_n)$ - функции принадлежности элементов $x_i \in X$, $y_n \in Y$ к нечётким подмножествам A'_j и B'_m соответственно, а выражение (1) представляет собой композиционное правило вывода [1, 3, 9].

Следует отметить, что несколько рассмотренных выше правил могут быть объединены, посредством слова «ИНАЧЕ». Например, «Если $\delta = A_1$ и, если $\delta' = B_1$, то $\alpha = C_1$, иначе, если $\delta = A_2$ и, если $\delta' = B_2$, то $\alpha = C_2$, иначе, ...» даст результирующее воздействие C при заданных A_j и B_m , т.к., соединительное «Иначе» в теории нечётких множеств интерпретируется как операция поиска max:

$$\mu_C(u_k) = \max_l \{ \mu_{C_1}(u_k), \dots, \mu_{C_l}(u_k), \dots, \mu_{C_L}(u_k) \}, \quad (2)$$

где $l=1, \dots, L$, $L=I \times N$ - число правил в НАУ.

Из (2) следует, что в формировании управляющего воздействия участвуют все правила. Для определения значения реального (чёткого) управляющего воздействия можно применить метод Мамдани [4,6], т.е. определить по центру тяжести кривой степени принадлежности $\mu_C(u_k)$, и, таким образом, реализация выражений (1) и (2) позволит определить управляющее воздействие в ИСУ траекторным движением МПО.

Далее в работе рассматриваются вопросы структурной организации спецпроцессора для ИСУ реального масштаба времени, ориентированного на параллельную и/или параллельно-поразрядную обработку нечёткой информации, а также аппаратной реализации нечётких алгоритмов принятия управленческих решений.

Анализ (1) и (2) показывает, что:

- величины $\mu_R(x_i, y_n, u_k)$ постоянные для данного объекта управления и не меняются во времени в процессе управления. Следовательно, значения $\mu_R(x_i, y_n, u_k)$ для всех правил L принятия решения можно хранить в качестве четырёх разрядных констант в L трёхмерных ассоциативных процессорных ячейках, каждой размером $I \times N \times K$, что, в свою очередь, позволяет сократить аппаратные затраты и совместить режимы хранения и

параллельной обработки нечёткой информации (рис. 5), а также даёт возможность, при необходимости изменять число правил в нечётких алгоритмах управления, т.к. каждая l -ая ассоциативная трёхмерная процессорная ячейка содержит l -ое декартово произведение трёх нечётких переменных;

- значения $\mu_{A'_j}(x_i)$ и $\mu_{B'_m}(y_n)$ описывают текущую ситуацию на объекте управления и могут быть использованы для определения степени близости с эталонными ситуациями на каждом шаге поиска управляющего воздействия. Из (1) видно, что в этом случае эти значения участвуют в определении функции принадлежности $\mu_{C'_s}(U_k)$ и их необходимо обрабатывать совместно с $\mu_R(x_i, y_n, u_k)$, поэтому в трёхмерных ассоциативных процессорных ячейках (рис. 5) предусмотрены дополнительно двумерные ячейки;

- основными операциями при вычислении управляющего воздействия по выражениям (1) и (2) являются операции поиска максимального числа из массива чисел, которые наиболее эффективно выполняются в ассоциативных запоминающих устройствах (АЗУ), так как основной особенностью таких запоминающих устройств является ориентация их структур на параллельную и/или параллельно-поразрядную обработку большого потока данных, что характерно и для реализации нечётких алгоритмов управления в ИСУ. В связи с этим, в работе разработано устройство поиска максимального числа в массиве чисел (рис. 6). Массив μ_{ink} , в начале процесса обработки чисел находится в ПЗУ. По сигналу «Зп. данных» (от управляющего устройства) происходит запись данных из ПЗУ в параллельно-последовательные регистры «Рг. данных» при наличии сигнала единичного уровня на входе «Режим Рг.». По сигналу «Режим Рг.»=0 регистры «Рг. Данных» переходят в последовательный режим работы и по тактовым импульсам происходит сдвиг данных в регистрах вправо, начиная со старшего разряда. В основу работы устройства положен известный алгоритм поразрядно-параллельного принципа действия, который заключается в следующем (рис. 6). Анализируются разрядные срезы всех чисел, расположенных в регистрах данных, начиная со старшего бита, и, если разрядный срез содержит только единицы или нули, то на следующем шаге анализируются все разряды следующего разрядного среза, так сигнал «сб. Рг.» с выхода элемента.

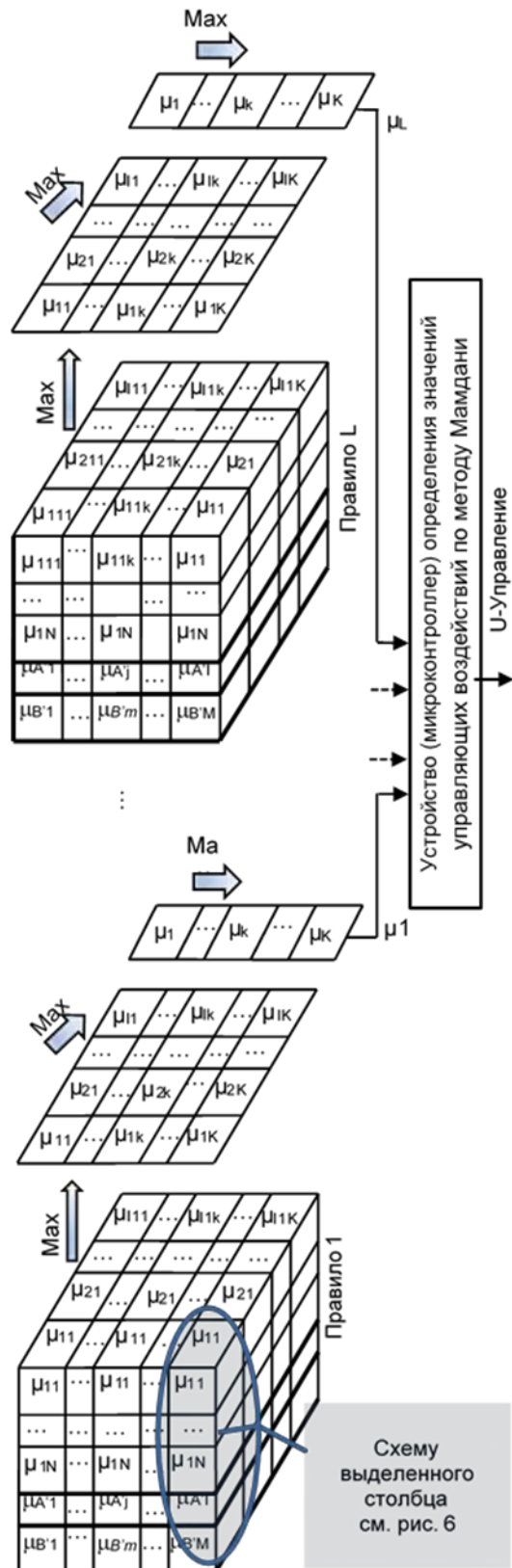


Рис. 5- Структурная схема трёхмерного процессора обработки нечёткой информации

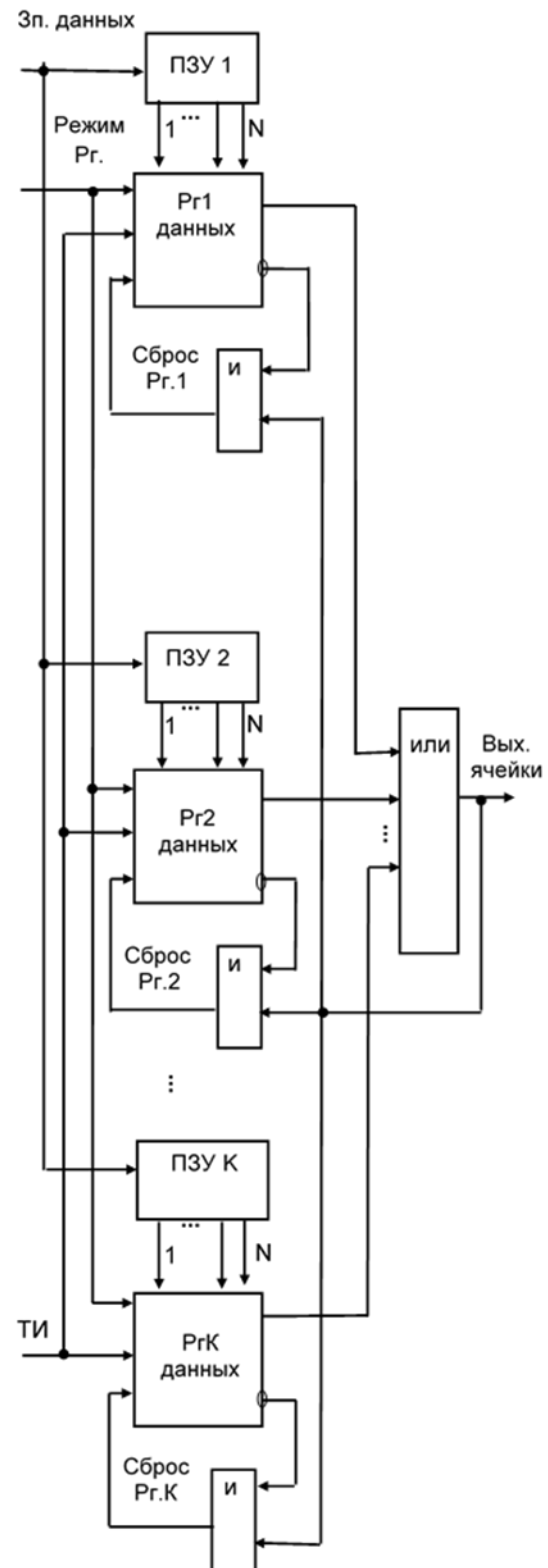


Рис. 6- Структурная схема процессорной ячейки для поиска максимального числа в массиве чисел

И блокируется сигналом нулевого уровня с инверсного выхода соответствующего регистра «Рг. Данных» при единичном срезе или сигналом с выхода элемента ИЛИ при нулевом срезе. Если же в разрядном срезе имеются нули и единицы, то на следующем шаге анализируются только те числа, которые в анализируемом срезе содержат единицы, и так до младшего разрядного среза. Выделенное на последнем шаге подмножество максимальных чисел по столбцам сохраняются в регистрах «Рг. Результата» соответствующего столбца и по сигналу «Чт. Результата» передаются в регистры данных двумерного процессора поиска максимального числа второго уровня.

Далее, найденные на втором уровне максимальные числа заносятся в регистры данных одномерного процессора третьего уровня. Таким образом получаем значения функции принадлежности $\mu_{ci}(U_k)$ для каждого правила i , где $i=1, \dots, L$. Значения $\mu_{ci}(U_k)$ передаются в управляющий микроконтроллер, где методом Мамдани [4,6] программно определяется реальное управляющее воздействие для данного состояния объекта управления.

Временные затраты на реализацию НАУ можно определить в условных тактах по формуле:

$t_{НАУ} = 3 \cdot (4n+1) \cdot t$, где n -разрядность поразрядно-параллельно обрабатываемых данных на трёх уровнях; t - длительность условного тактового импульса, которая зависит от быстродействия элементной базы процессорных ячеек.

Предложенные трёхуровневые структуры процессора, состоящие из однотипных единиц (ячеек), реализации которых на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) представляется наиболее эффективным способом их построения, что также обеспечивает модульный принцип построения процессора, и дают возможность перестройки его структуры при необходимости.

4. Структурная схема интеллектуальной системы управления траекторным движением морского подвижного объекта

На рис. 7 приведена структурная схема интеллектуальной системы управления траекторным движением морского подвижного объекта, построенная на основе разработанных в работе принципов их построения. Функцией ИСУ является целенаправленное и качественное функционирование в реальном времени в сложной проблемной внешней среде и состоит из программно реализуемых на ведущем процессоре взаимосвязанных подсистем:

-подсистема восприятия и представления знаний формирует связь с внешней средой посредством различных сенсоров, преобразует, сохраняет и представляет информацию в удобном виде;

-подсистема сбора информации и исполнения команд предназначена для съёма первичной информации о состоянии управляемого объекта и формирования реального управляющего воздействия;

-подсистема планирования траекторий и цели представляет собой формирователь траектории для

достижения поставленной цели с учётом препятствий по пути следования;

-подсистема оценки качества управления и накопление опыта. В качестве оценки качества управления могут быть приняты различные критерии в зависимости от решаемой задачи, например, для задач управления траекторным движением МПО таким критерием может быть *среднеквадратическое отклонение от заданной траектории*. Если значение критерия больше некоторого допустимого порога, то правила управления корректируются.

-подсистема определения *Отклонение δ и Скорость изменения отклонения δ'* . При решении задач управления траекторным движением, где база знаний представлена виде нечётких алгоритмов, значения переменных *отклонения и скорость изменения отклонения* рассчитываются и преобразуются в лингвистические (нечёткие) переменные программным способом и подаются на соответствующие входы специализированного процессора (рис. 5) для совместной обработки с нечёткими алгоритмами управления траекторным движением МПО;

-подсистема аппаратной реализации логико-лингвистической модели принятия управленческих решений, обработки и хранения нечёткой базы знаний, предназначена для определения функции принадлежности нечёткого управления по выражению (1) в реальном времени. Значение этой функции передаётся в ведущий процессор (рис. 7), где и определяется управляющее воздействие для данного состояния МПО. Сигналы управления спецпроцессором формируются ведущим процессором.

Заключение

В работе разработаны основные принципы построения ИСУ траекторным движением МПО, базирующихся на логико-лингвистических (нечётких) моделях представления знаний. Приведены результаты математического моделирования процесса нечёткого управления МПО по заданной криволинейной траектории при различных внешних воздействиях и при изменении параметров управляемого объекта, которые показали, что нечёткие правила принятия управленческих решений являются достаточно универсальными и могут быть применены не только для построения интеллектуальных систем управления МПО различного назначения, но и другими сложными динамическими объектами.

Предложена обобщённая структурная схема ИСУ движением МПО по заданной траектории на основе специализированного ассоциативного процессора поразрядно-параллельного принципа действия для аппаратной реализации нечётких алгоритмов управления неопределёнными процессами и классификации сложных объектов. Применение предложенного специализированного процессора совместно с микроконтроллером позволит создавать аппаратное обеспечение ИСУ и систем классификации динамических объектов в реальном времени при незначительных затратах.

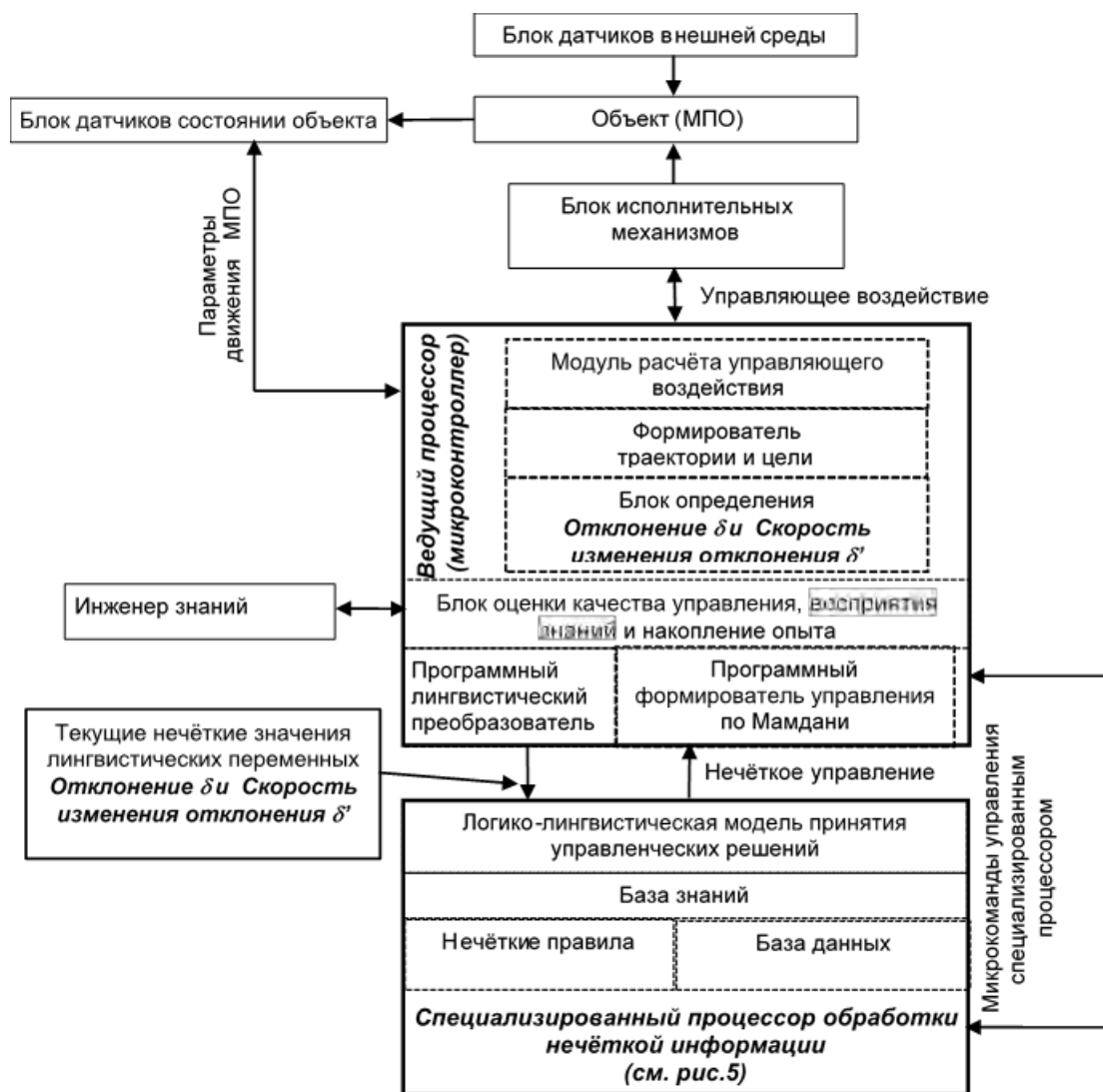


Рис. 7- Структурная схема интеллектуальной системы управления траекторным движением на базе специализированного процессора

Литература

- Заде Л.А. Понятие лингвистического переменного и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 168 с.
- Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963, v. 8, p. 338-353.
- Прикладные нечеткие системы / Тэрано Т., Асаи К., Сугено М., 1993
- Магомедов, И. А. Математическая и аппаратная поддержка логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами / И. А. Магомедов, Г. Х. Ирзаев. – Махачкала : Типография ФОРМАТ, 2022. – 159 с. – ISBN 978-5-907484-61-0. – EDN SCTFFI.
- Магомедов, И. А. Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами / И. А. Магомедов, М. М. Мирзабеков, Т. Г. Айгумов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 59-78. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78. – EDN SESDXF.
- Магомедов И.А. Логико-лингвистические модели управления движением морского подвижного объекта//Известия Института инженерной физики. 2015. Т. 2. № 36. С. 52-59.
- King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. Automatica. 1977;13:235-242.
- Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. Inform. Control, 1978; 27(3):431-440.
- Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEC, 1974;212:1383--1389.
- <https://studfile.net/preview/1379719/page:9/>
- Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Информационно-аналитическая модель нечеткого пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (1):48-60. DOI:10.21822/2073-6185- 2017-44-1-48-60

12. <https://riorpub.com/ru/nauka/monography/612/view>
13. Кокаев О.Г., Магомедов И.А. К вопросу построения ассоциативных вычислительных структур для обработки нечёткой информации Рук. депонир. в ВИНТИ 4.05.1982, Л-2171-82
14. Магомедов А. И., Алиев А. М. Структурная организация трёхмерного процессора для хранения и обработки нечёткой информации/Материалы докладов VIII Международной молодёжной научной конференции «Тирчуринские чтения» / в 4 т., Т. 1.-Казань: Казан. Энерг. Ун-т, 2013.-с. 112-113
15. Магомедов И.А., Кокаев О.Г., Нечаев В.А. Ассоциативный параллельный процессор для обработки нечеткой информации. II Всесоюзное совещание "Высокопроизводительные вычислительные системы" октябрь 1984, Батуми
16. <https://cyberleninka.ru/article/n/apparatnaya-realizatsiya-nechetkih-kontrollerov-na-plis/viewer>
17. <http://nrsu.bstu.ru/chap31.html>
18. Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных систем управления: теоретические и прикладные аспекты // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1991. - № 3
19. Соколов С.В. Некогерентно-оптический матричный процессор // Оптический журнал. 1998. № 9.]
20. Мелихов А.Н., Баронец В.Д. Проектирование микропроцессорных средств обработки нечёткой информации. Ростов н/Д. Издательство Ростовского университета. 1990. 128с.
21. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. Учебное пособие для ВУЗов водного транспорта. – М.: Транспорт, 1977. – 456 с.
22. Шигапов, Р. Д. Обучение нейро-нечеткой системы управления характеристикам заданной системы управления движением необитаемого подводного аппарата / Р. Д. Шигапов // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 2. – С. 44-48. – EDN PAJVOP.
23. Bykovtsev, Y. A. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller / Y. A. Bykovtsev, V. M. Lokhin // Mechatronics, Automation, Control. – 2021. – Vol. 22, No. 12. – P. 619-624. – DOI 10.17587/mau.22.619-624. – EDN SJPPXW.
24. Филатов, В. И. Синтез нечёткой системы автоматического управления скоростным режимом автономного судна при следовании по программной траектории / В. И. Филатов, В. В. Астреин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 1-1(59). – С. 245-253. – DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.032. – EDN ASMGIV.
25. Глушков, С. В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна / С. В. Глушков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 28-32. – EDN KPTCNF.
26. Патент № 2477525 С2 Российская Федерация, МПК G06N 5/04. Микроконтроллер с аппаратным нечетким вычислителем переменной структуры : № 2011126057/08 : заявл. 17.06.2011 : опубл. 10.03.2013 / А. Е. Васильев, М. М. Шилов. – EDN BPBPFL.
27. Дембицкий, Н. Л. Интерполирующий нечеткий процессор для автоматических регуляторов / Н. Л. Дембицкий // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 7. – С. 23-31. – EDN ZCCNQB.

References

1. Zade L.A. Ponjatje lingvisticheskogo peremennogo i ego primenenie k prinjatiju priblizhennyh re-shenij [The concept of linguistic variable and its application to making approximate decisions]. - М.: Mir, 1976. - 168 s.
2. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963, v. 8, p. 338-353.
3. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Tjerano T., Asai K., Sugeno M., 1993
4. Magomedov, I. A. Matematicheskaja i apparatnaja podderzhka logiko-lingvisticheskikh modelej upravlenija slozhnymi dinamicheskimi ob#ektami. [Mathematical and hardware support of logical-linguistic control models of complex dynamic objects]/ I. A. Magomedov, G. H. Irzaev. – Mahachkala : Tipografija FORMAT, 2022. – 159 s. – ISBN 978-5-907484-61-0. – EDN SCTFFI.
5. Magomedov, I. A. Problemy postroenija logiko-lingvisticheskikh modelej upravlenija slozhnymi dinamicheskimi ob#ektami/ [Problems of constructing logical-linguistic models of management of complex dynamic objects]. I. A. Magomedov, M. M. Mirzabekov, T. G. Ajgumov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskije nauki. – 2022. – T. 49, № 1. – S. 59-78. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78. – EDN SESDXF.
6. Magomedov I.A. Logiko-lingvisticheskie modeli upravlenija dvizheniem morskogo podvizhnogo ob#ekta. [Logical and linguistic models of motion control of a marine mobile object], Izvestija Instituta inženernoj fiziki. 2015. T. 2. № 36. S. 52-59.
7. King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. Automatica. 1977; 13:235-242.
8. Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. inform. Control, 1978; 27(3):431-440.
9. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEC, 1974;212:1383-
10. <https://studfile.net/preview/1379719/page:9/>
11. Abduragimov T.T., Melekhin V.B., Khachumov V.M. Information-analytical model of a fuzzy proportional-integral-differentiating regulator [Information-analytical model of a fuzzy proportional-integral-differentiating regulator]. Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. 2017;44 (1):48-60. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-48-60
12. <https://riorpub.com/ru/nauka/monography/612/view>

13. Kokaev O.G., Magomedov I.A. K voprosu postroeniya associativnyh vychislitel'nyh struktur dlja obrabotki nechjotkoj informacii [On the issue of constructing associative computing structures for processing fuzzy]. Ruk. deponir. v VINITI 4.05.1982, L-2171-82
14. Magomedov A. I., Aliev A. M. Strukturnaja organizacija trjohmernogo processora dlja hranenija i ob-rabotki nechjotkoj informacii [Structural organization of a three-dimensional processor for storing and processing fuzzy information]. Materialy dokladov VIII Mezhdunarodnoj molodjozhnoj nauchnoj konferencii «Tirchurinskie chtenija» / v 4 t., T. 1.-Kazan': Kazan. Jenerg. Un-t, 2013.-s. 112-113
15. Magomedov I.A., Kokaev O.G., Nechaev V.A. Associativnyj parallel'nyj processor dlja obrabotki nechetkoj informacii [Nechaev V.A. Associative parallel processor for processing fuzzy information]. II Vsesojuznoe soveshhanie "Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy" ok-tjabr' 1984, Batumi
16. <https://cyberleninka.ru/article/n/apparatnaya-realizatsiya-nechetkih-kontrollerov-na-plis/viewer>
17. <http://nrsu.bstu.ru/chap31.html>
18. Ul'janov S.V. Nechetkie modeli intellektual'nyh promyshlennyh sistem upravlenija: teoretiche-skie i prikladnye aspekty [Fuzzy models of intelligent industrial control systems: theoretical and applied aspects]. Izv. AN SSSR. Tehniceskaja kibernetika, 1991. - № 3
19. Sokolov S.V. Nekogerentno-opticheskij matrichnyj processor [Incoherent optical matrix processor]. Opticheskij zhurnal. 1998. № 9.]
20. Melihov A.N., Baronec V.D. Proektirovanie mikroprocessornyh sredstv obrabotki nechjotkoj in-formacii [Design of microprocessor processing tools for fuzzy information]. Rostov n/D. Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta. 1990. 128s.
21. Basin A.M. Hodkost' i upravljaemost' sudov. [Seaworthiness and controllability of vessels] Uchebnoe posobie dlja VUZov vodnogo transporta. – M.: Transport, 1977. – 456 s.
22. Shigapov, R. D. Obuchenie nejro-nechetkoj sistemy upravlenija harakteristikam zadannoj sistemy upravlenija dvizheniem neobitaemogo podvodnogo apparata [Training of a neuro-fuzzy control system characteristic of a given motion control system of an uninhabited underwater vehicle]/ R. D. Shigapov // Avtomatizacija processov upravlenija. – 2012. – № 2. – S. 44-48. – EDN PAJVOP.
23. Bykovtsev, Y. A. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller / Y. A. Bykovtsev, V. M. Lokhin // Mechatronics, Automation, Control. – 2021. – Vol. 22, No. 12. – P. 619-624. – DOI 10.17587/mau.22.619-624. – EDN SJPPXW.
24. Filatov, V. I. Sintez nechjotkoj sistemy avtomaticheskogo upravlenija skorostnym rezhimom avtonomnogo sudna pri sledovanii po programmnoj traektorii [Synthesis of a fuzzy automatic speed control system for an autonomous vessel following a program trajectory]/ V. I. Filatov, V. V. Astrein // Morskie intellektual'nye tehnologii. – 2023. – № 1-1(59). – S. 245-253. – DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.032. – EDN ASMGIV.
25. Glushkov, S. V. Ispolzovanie nechetkoj logiki v sisteme avtomaticheskogo upravlenija kursom sudna [The use of fuzzy logic in the ship's automatic course control system] / S. V. Glushkov // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2007. – № 8. – S. 28-32. – EDN KPTCNF.
26. Patent № 2477525 C2 Rossijskaja Federacija, MPK G06N 5/04. Mikrokontroller s apparatnym nechetkim vychislitelem peremennoj struktury [Microcontroller with hardware fuzzy variable structure calculator]: № 2011126057/08 : zajavl. 17.06.2011 : opubl. 10.03.2013 / A. E. Vasil'ev, M. M. Shilov. – EDN BPBPFL.
27. Dembickij, N. L. Interpolirujushhij nechetkij processor dlja avtomaticheskikh reguljatorov [Interpolating fuzzy processor for automatic regulators] / N. L. Dembickij // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2017. – № 7. – S. 23-31. – EDN ZCCNQB.

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

Магомедов Алигаджи Исаевич, аспирант кафедры программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем, Дагестанский государственный технический университет, 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. Имама Шамиля, д. 70. AG_Magomedov94@mail.ru

Aligaji I. Magomedov, graduate student of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Dagestan State Technical University, 367026, Republic of Dagestan, Makhachkala, ave. Imam Shamil, 70. AG_Magomedov94@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.12.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.03.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 22.03.2024.

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.025>

Технологии адаптации морских портов к изменению климата

Малыгин И.Г.¹ malygin_com@mail.ru, Цыганов В.В.¹ tsyganov_v_v@mail.ru,
Савушкин С.А.¹ ssavushkin@mail.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Эффективность работы морского транспорта зависит от погодно-климатических условий. Проведен анализ влияния и потенциальных последствий основных факторов изменения климата для морского транспорта. Рассмотрено воздействие этих факторов на процессы и объекты морских портов. Указано на возможные проблемы морских портов, связанные с изменением климата. К их числу относятся последствия учащающихся экстремальных климатических явлений для инфраструктуры и функционирования морских портов. Дана общая характеристика прогнозируемого изменения климата в прибрежных регионах России, в которых расположены морские порты. Приведены прогнозы климатических показателей, которые могут существенно повлиять на надежность и безопасность существующих и проектируемых сооружений портовой инфраструктуры. Рассмотрены подходы к адаптации морских портов к изменению климата. Проанализирован практический опыт учета влияния изменения климата на морские порты. Отмечено, что наращивание потенциала адаптации портов требует развития организационных возможностей эффективного реагирования на проблемы, связанные с изменением климата, включая исследования, информационно-разъяснительную работу, повышение квалификации, сбор данных и мониторинг. Охарактеризованы технологии адаптации морских портов к изменению климата. Конкретное их содержание зависит от особенностей природно-климатических условий, социально-экономического положения и ресурсной обеспеченности территорий, на которой расположены морские порты.

Ключевые слова: морской транспорт, порт, инфраструктура, изменение климата, регион, адаптация.

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

Для цитирования: Малыгин И.Г., Цыганов В.В., Савушкин С.А. Технологии адаптации морских портов к изменению климата. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 219—231. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.025

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.025>

Technologies for adaptation of seaports to climate change

Igor G. Malygin¹ malygin_com@mail.ru, Vladimir V. Tsyganov¹ tsyganov_v_v@mail.ru,
Sergey A. Savushkin¹ ssavushkin@mail.ru¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The efficiency of maritime transport depends on weather and climatic conditions. The analysis of the impact and potential consequences of the main factors of climate change for maritime transport has been carried out. The impact of these factors on the processes and facilities of seaports is considered. Possible problems of seaports related to climate change are indicated. These include the effects of increasing extreme climatic events on the infrastructure and functioning of seaports. A general description of the projected climate change in the coastal regions of Russia, where seaports are located, is given. Forecasts of climatic indicators that can significantly affect the reliability and safety of existing and projected port infrastructure facilities are presented. Approaches to adaptation of seaports to climate change are considered. The practical experience of taking into account the impact of climate change on seaports is analyzed. It was noted that building port adaptation capacity requires the development of organizational capabilities to effectively respond to climate change issues, including research, awareness-raising, professional development, data collection and monitoring. The technologies of adaptation of seaports to climate change are characterized. Their specific content depends on the peculiarities of natural and climatic conditions, socio-economic situation and resource availability of the territories where the seaports are located.

Keywords: maritime transport, port, infrastructure, climate change, region, adaptation.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Igor G. Malygin, Vladimir V. Tsyganov, Sergey A. Savushkin Technologies for adaptation of seaports to climate change. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 219—231. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.025

Введение

Несмотря на санкционную политику Запада и отказ иностранных судоходных компаний во фрахте судов из портов Российской Федерации (РФ), грузооборот морского транспорта РФ (МТ) растет. Грузопотоки переключаются на МТ ввиду введения недружественными странами ограничений и запретов на перевозки иными видами транспорта РФ. Строятся, модернизируются и реконструируются перегрузочные комплексы в морских портах (МП). Совокупный прирост мощности МП РФ в 2023 году составил 68,2 млн тонн (в 2022 г. прирост составлял 56,0 млн тонн) [1].

Бесперебойная работа МТ и МП имеет важное значение для реализации многих экономических и социальных функций. Однако эффективность работы МТ, МП и портовой инфраструктуры (ПИ) зависит от погодноклиматических условий. Изменение климата (ИК) влечет за собой такие явления, как повышение среднего уровня моря, рост температуры воды, усиление циклонов и штормовых нагонов, потенциальные изменения волнового режима. Экстремальные климатические явления, связанные с ИК, могут иметь разнообразные последствия для МТ, зависящие от локальной и региональной динамики факторов ИК, природной среды, вида МП и ПИ и их уязвимых мест.

В последние годы проводились исследования, связанные с анализом и моделированием ИК и климатических рисков, оказывающих влияние на работу транспортных узлов и сетей. Разработан Комплекс моделей для управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики в условиях ИК [2], основанный на теории управления большими транспортными системами [3].

Работы [4-6] посвящены исследованию влияния ИК на железнодорожный транспорт. В [4] проанализирована информация о происшествиях на железных дорогах, вызванных климатическими причинами. Выявлены и систематизированы климатические факторы, вызвавшие эти происшествия. В [5] проанализирована информация об ущербах от таких происшествий, а также о расходах на их ликвидацию. Предложены методы оценки стоимости мероприятий, проводимых для адаптации железнодорожной инфраструктуры к ИК. В [6], на основе изучения статистики и последствий опасных гидрометеорологических явлений,

разработаны сценарии влияния климатических воздействий на инфраструктуру железнодорожного транспорта. Получены оценки климатических рисков и ущербов от происшествий, связанных с ИК, затрат на их ликвидацию, а также инвестиций, направляемых на адаптацию железнодорожной инфраструктуры РФ к ИК.

В настоящей статье проводится анализ ИК и климатических рисков, оказывающих влияние на работу МТ, МП и ПИ, а также транспортных узлов и сетей в прибрежных районах.

Последствия изменения климата для морского транспорта

Климатические изменения оказывают значительное воздействие на состояние морских путей и эффективность функционирования МТ, расходы на содержание объектов МТ, безопасность движения и скорость транспортных потоков.

С одной стороны, рост зимних температур воздуха и сокращение холодного периода благоприятны для увеличения сроков эксплуатации машин, периода навигации на морях, снижения расходов на строительные и ремонтные работы. С другой стороны, потепление сопровождается частыми перепадами температуры, которые способствуют ускоренному разрушению объектов инфраструктуры. Повышение температуры провоцирует таяние многолетнемерзлых грунтов, вызывая негативные воздействия на инженерные сооружения. Особенно интенсивно процесс разрушения происходит при частых переходах температуры воздуха через 0°C. Такие переходы, наряду с большими перепадами температуры воздуха, приводят к ускоренному старению материалов, из которых сделаны объекты инфраструктуры МТ, к снижению срока их службы [7].

Увеличение количества жидких осадков, сопровождающих оттепели усиливает процесс разрушения. Значительное негативное влияние оказывает увеличение максимальной интенсивности и суточного максимума осадков в теплый и в холодный периоды года. Сильные дожди в теплый период сопровождаются наводнениями и паводками, наносящими существенный ущерб транспортным коммуникациям и ПИ. На всех морях можно ожидать увеличения повторяемости туманов в зимне-осенний период из-за увеличения площади чистой воды и повышения ее температуры. Возможные последствия ИК для МТ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Потенциальные последствия факторов ИК для МТ

Фактор	Последствия фактора ИК для морского транспорта
Температура	
Повышение средних температур; Периоды аномальной жары, засухи Более частая смена теплых и холодных дней	Повреждение объектов инфраструктуры МТ, оборудования и грузов; рост энергопотребления для охлаждения грузов; понижение уровня воды и ограничение внутренней навигации; снижение расходов на уборку снега, льда и увеличению продолжительности периода строительных работ
Деградация и таяние вечной мерзлоты; сокращение площади арктических льдов	Нарушение инфраструктуры; увеличение срока навигации по Северному морскому пути (СМП); сокращение протяженности маршрутов на СМП и расходов на топливо при увеличении расходов на вспомогательное обслуживание
Осадки	
Изменение интенсивности и частоты экстремальных осадков (наводнения и засухи)	Затопление наземной инфраструктуры; повреждение грузов и оборудования

Ветры и грозы	
Изменение частоты и интенсивности явлений	Проблемы с навигацией и швартовкой в портах
Уровень моря и штормы	
Изменение среднего уровня моря, силы и направления волн; усиление штормов и штормовых нагонов	Повреждение объектов инфраструктуры, грузов в результате затопления и усиления волн; увеличение расходов на строительство и обслуживание объектов МТ; заиливание портовых и судоходных каналов; воздействие на ключевые транзитные пункты и каналы; перемещение людей, предприятий, страховые проблемы

Последствия ИК, вызванные ростом температуры, изменением режима осадков и повышением уровня моря, окажут значительное влияние и на судоходство по рекам. Увеличение повторяемости засух вызовет снижение уровня воды и скорости течения, что будет создавать препятствия для навигации и приводить к росту числа аварий (посадок на мель) и увеличению потребления топлива. Рост числа половодий приведет к приостановке судоходства, а также к изменениям в режимах и морфологии процессов осадкообразования в реках и повреждениям береговых дорог, ПИ, самих берегов и противопаводковых сооружений.

Штормовое волнение ведет к уменьшению скорости судна, создает угрозу сохранности грузов. Сильный ветер уменьшает эффективность и безопасность погрузочно-разгрузочных работ, вызывает сгонно-нагонные явления и быстрые изменения уровня моря, создающие угрозу для безопасности судоходства. Туманы и ливневой снег могут привести к уменьшению скорости судов для обеспечения безопасности мореплавания и, как следствие, дополнительным затратам судового времени.

Повышение среднего уровня моря отмечается на всех морях. Но интенсивность его невелика, и в первой половине XXI века, скорее всего, оно не будет представлять угрозы. Позднее, купирование негативного влияния роста уровня моря на МТ и условия прибрежного плавания станет актуальным. Повышение уровня моря, рост числа и интенсивности штормов, увеличение продолжительности безледного периода в прибрежной зоне будут способствовать более интенсивному разрушению берегов, сложенных рыхлыми и льдистыми породами. Это угрожает прибрежной инфраструктуре и ведет к изменению внешних границ территориальных вод, исключительной экономической зоны и континентального шельфа РФ.

При сохранении существующих трендов ИК, ледовые условия на трассах СМП заметно изменятся. Сократится ледовая поверхность в окраинных арктических морях в летний сезон, вплоть до полного очищения ото льда в конце теплого периода. Однако, в зимний период лед будет повсеместно. По прогнозам, в XXI веке ледяной покров будет присутствовать на акватории СМП более шести месяцев в году. Поэтому для круглогодичного функционирования СМП необходимо развитие ледокольного флота [8].

Низкие температуры, сильные ветры, плохая видимость, атмосферное обледенение, морское волнение, штормовые нагоны, ледовые сжатия, воздействия на сооружения крупных и гигантских ледяных полей, айсбергов, торосов, навалы льда на

берег и раннее ледообразование являются источниками погодно-климатических рисков.

Влияние ИК на экономику и размещение промышленности затронет транспортные услуги и отразится на международных транспортных потоках. Воздействия ИК на транспортные узлы и службы МТ будут иметь масштабные последствия для международной торговли, более 80% которой осуществляется по морю. Изменится объем и структура перевозок [9].

Таким образом, наблюдаемые и ожидаемые ИК оказывают в целом негативное воздействие на функционирование МТ. Основные виды неблагоприятных воздействий ИК проявляются уже в настоящее время и должны быть учтены при проектировании и определении уровня приемлемых рисков, технологий, конструктивно-технических и организационно-технологических решений, устройств и сооружений [7].

Проблемы морских портов, связанные с изменением климата

Повышение уровня моря, штормовые нагоны и волны могут иметь негативные последствия для береговых районов, МП и ПИ. Аномальная жара нарушает нормальный режим их работы. Повышение интенсивности тропических штормов и ураганов может стать причиной более частого причинения ущерба ПИ, сбоев в работе МП и срыва перевозок. Статистический анализ прибрежного уровня моря в период 1900–2010 годов показал, что уровень штормового нагона воды, вызываемого тропическими циклонами на побережье Мексиканского залива США, колеблется от 2,7 м за двухлетний период наблюдений до 8,2 м за столетний период.

Потепление в Арктике приведет не только к уменьшению толщины морского льда и увеличению продолжительности навигации в Заполярье, но и к усилению эрозии берегов из-за повышения активности волн. Таяние вечной мерзлоты может привести к повреждению ПИ. Поэтому для обеспечения устойчивости работы МП требуется разработка соответствующей политики [9].

Неблагоприятная волновая обстановка может приводить к закрытию МП. Гавани могут стать непригодными для больших судов, например, вследствие проникновения в них длиннопериодных волн, порождаемых волнами зыби. Масштабы и распределение воздействия на МП зависят от особенностей природной среды (например, наличия прибрежных водно-болотных угодий, способных гасить силу штормовых нагонов), так и от антропогенных факторов (например, систем управления водными ресурсами и мелиоративных систем).

Некоторые МП соединены не с открытыми берегами, а с эстуариями. В эстуариях повышение

уровня моря может увеличивать опасность затопления МП, особенно в тех случаях, когда штормовые нагоны совпадают по времени с увеличением речного стока. Повышение уровня моря может также приводить к изменениям регионального приливного режима. Это важно для МП, расположенных на открытых побережьях и в устьях рек (в частности, для проектирования защитных сооружений и дноуглубительных работ).

Тропические циклоны (и связанные с ними штормовые нагоны и волновые наводнения) выявляют уязвимые места в проектировании и строительстве ПИ. Масштабы затопления объектов ПИ при штормовых нагонах более значительны, чем в процессе долговременного повышения среднего

уровня моря. В таблице 2 охарактеризованы основные уязвимости и последствия воздействия факторов ИК на процессы и объекты инфраструктуры МП.

МП будут подвергаться воздействию ИК из-за:

- длительного срока эксплуатации их основных объектов, поскольку многие существующие МП проектировались в расчете на значительно более мягкий климат;
- их расположения в незащищенных местах;
- их зависимости от торговли, судоходства и внутреннего транспорта, которые также уязвимы к ИК (в том числе к изменениям спроса на транспортные услуги).

Таблица 2

Воздействие факторов ИК на процессы и объекты инфраструктуры МП

Процессы и объекты МП	Фактор ИК	Последствия для МП
Навигация и стоянка судов	Повышение уровня моря	Сокращение масштабов дноуглубительных работ, модернизация причалов, мостовые переходы
	Штормовые нагоны и ветры	Невозможность швартовки, скопление судов
	Усиление осадков	Затопление, расширение дноуглубительных работ
	Уменьшение осадков	Ограничения внутреннего судоходства
	Морские льды	Изменение условий доступа в порт
Обработка грузов	Повышение частоты и усиление штормов	Причинение ущерба, ограничение возможностей работы кранов или погрузки, разгрузки насыпных и наливных грузов из-за ветров и молний
Хранение грузов	Штормовые нагоны и усиление осадков	Затопление в прибрежных районах или по берегам рек складских площадок и объектов, разрушения, материальный ущерб инфраструктуре, порча грузов
	Повышение температуры	Причинение материального ущерба конструкциям, увеличение расходов на энергоснабжение
Движение транспорта в порту	Штормовые нагоны, усиление осадков и отсутствие адекватной дренажной системы	Затопление портовых сооружений затрудняет необходимое движение транспортных средств
	Хроническое или окончательное затопление	Некоторые части порта непригодны к эксплуатации
Инфраструктура, строения и оборудование	Затопление и сильные ветры	Угроза для зданий и оборудования
	Повышение уровня моря и штормовые нагоны	Ущерб основной защитной инфраструктуре
	Штормовые нагоны и вызванная наводнением эрозия	Ущерб мостам, причалам и пирсам
	Повышение температуры	Выход из строя элементов оборудования и инфраструктуры
Внутренние транспортные сети	Нарушение наиболее важных звеньев сетей	Непригодность порта к эксплуатации

Исследование порта Мусельес-эль-Боске в Картахене (Колумбия) показало, что последствия ИК зависят от места расположения, вида и эксплуатационных возможностей порта, наличия защищенных гаваней и глубоководных участков [9].

Исследование, проведенное путем опроса членов Международной ассоциации портов и гаваней и Американской ассоциацией портовых властей, показало, что об общем воздействии ИК на МП, как правило, имеется определенное представление, но его конкретные последствия не изучены. Респонденты разделили последствия экстремальных явлений (штормов) на 6 групп [9]:

- непосредственный ущерб;
- засорение территории порта обломками;
- последствия для коммерческих операций;

— местные и региональные последствия за пределами порта;

— нарушение работы интермодальных систем и производственно-сбытовых цепей;

— ухудшение состояния окружающей среды.

В результате изучения уязвимости ключевых объектов инфраструктуры США на побережье Мексиканского залива были сделаны выводы о том, что:

— в случае повышения относительного уровня моря на 1,2 м. могут быть затоплены более 70% портовых сооружений;

— в случае штормового нагона воды до уровня 5,5 м, в зоне поражения могут оказаться 98% портовых сооружений;

– связи интермодальных систем, включая перевозку грузов в порты и из портов, могут быть серьезно нарушены даже при затоплении отдельных небольших участков дорог;

– ключевые портовые сооружения наиболее уязвимы в случае возникновения экстремальных погодных условий и штормового нагона;

– масштабы затопления ключевых объектов ПИ в результате штормового нагона будут более значительными, чем в результате долговременного повышения уровня моря, которое, тем не менее, усугубляет проблему штормовых нагонов.

Исследования последствий ИК для МП Евросоюза в результате повышения среднего уровня моря и штормовых нагонов показали, что под угрозой находятся 4,1% всей ПИ [9].

В рамках исследования методом комплексной оценки, включающим количественный, качественный и всесторонний подходы, были проанализированы последствия ИК для эксплуатации МП Австралии и его потенциальное воздействие на ПИ. Степень воздействия и предполагаемые последствия ИК для МП зависят от региона, места, высоты над уровнем моря и состояния ПИ. Оценка рисков включала шесть основных процедур:

- системный анализ портов;
- учет результатов наблюдений за климатом и погодой;
- прогнозы ИК;
- сопоставление информации о климате с исследовательскими задачами (оценка рисков и планирование адаптации инфраструктуры и функций);
- сбор климатологической информации по портам - объектам целевых исследований.

Изменение режима осадков может привести к изменению стока рек и тем самым существенно повлиять на портовые операции. Во время краткосрочных дождевых паводков в уязвимом положении оказываются также портовые сооружения, а из-за заиления, вызванного особо сильными осадками, может уменьшиться глубина

фарватера, вследствие чего существенно вырастут расходы на дноуглубительные работы.

Экстремальные ветры, связанные с тропическими штормами, могут стать причиной перелива защитных сооружений и затоплений в прибрежных районах и эстуариях, причинения ущерба портовым сооружениям и оборудованию, например, кранам и погрузочным терминалам, нарушения нормального функционирования морских буровых платформ. Изменение преобладающего направления ветров и ветровых волн может иметь серьезные последствия для эксплуатации и обеспечения безопасности МП, а также для связанной с ними автомобильной и железнодорожной инфраструктуры в прибрежных районах.

Прогнозы и влияние изменения климата на российские порты

МП расположены на территории 6 федеральных округов РФ [9]. Прогнозы ИК в этих округах позволяют судить о возможном влиянии ИК на расположенные там МП. Рисунки 1-7 иллюстрируют прогнозные изменения климатических показателей на территории этих округов и Арктической зоны РФ (АЗРФ) на 2050-2059 гг., по сравнению с 1990-1999 гг. [7].

Изменение термического режима, происходящее в АЗРФ, благоприятствуют проведению работ на открытом воздухе. Растет число дней с температурой воздуха выше -30°C (рис. 1). Уменьшается период с отрицательными значениями температуры воздуха, когда невозможно выполнение отдельных строительных работ. С точки зрения надежности существующих и проектируемых сооружений, важна адекватная оценка изменений характеристик экстремальности термического режима. В условиях АЗРФ, низкие и высокие температуры воздуха, большие перепады температуры (в течение года или в течение суток), частые переходы температуры воздуха через 0°C приводят к возникновению повышенных температурных деформаций и напряжений, которые ухудшают прочностные характеристики элементов сооружений ПИ и снижают их несущую способность.

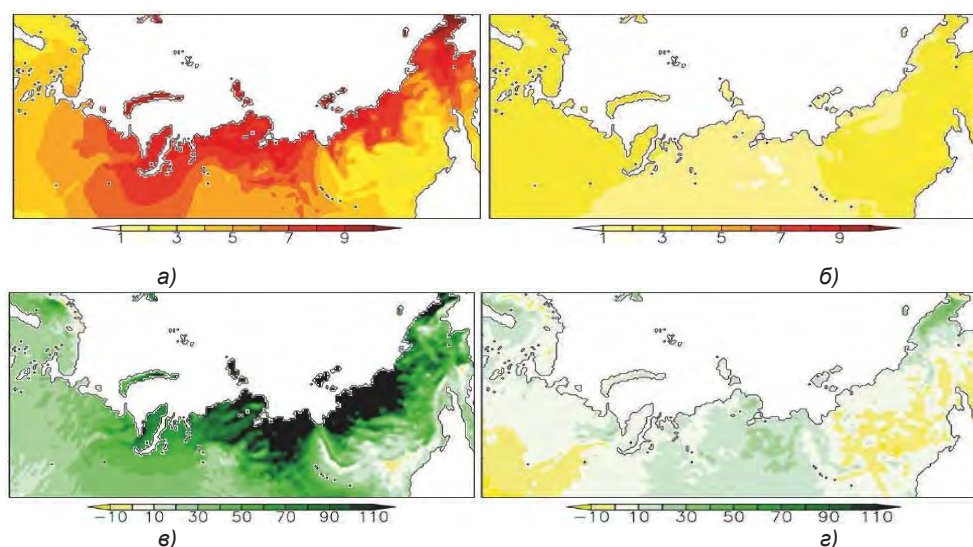


Рис. 1. Изменение средней сезонной температуры воздуха у поверхности ($^{\circ}\text{C}$) (а, б) и сумм атмосферных осадков (%) (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) календарных сезонов

На протяжении XXI века в МП европейской части АЗРФ будут в наибольшей степени проявляться эффекты потепления климата. Значительное увеличение продолжительности теплого периода года улучшит условия эксплуатации ПИ (за счет меньшей частоты возникновения условий обледенения), а также уменьшит затраты на обработку и хранение грузов. Вместе с тем, высокие летние температуры, число дней с которыми будет возрастать, оказывают негативное воздействие на функционирование портов: увеличивается нагрузка на чувствительное к температуре оборудование, растут энергозатраты на хранение портящихся грузов.

Существенный негативный фактор ИК - увеличение количества и интенсивности осадков. Особенно высокие риски связаны с увеличением экстремальных суточных сумм осадков в теплый сезон, которые могут привести к возникновению оползней и разрушению объектов ПИ. Сильный дождь - фактор риска для электрооборудования портовых кранов. Ожидаемое усиление конвективных процессов, рост интенсивности летних осадков и продолжительности гроз приведут к увеличению простоев портовых кранов. Возрастают риски разрушения ПИ, связанные с усилением штормо-волновой активности в арктических морях.

Для оценки рисков и оптимизации принимаемых решений на региональном уровне недостаточно знать средние величины будущих изменений показателей климата. Следует представлять, с какой вероятностью на выбранном временном интервале можно ожидать то или иное значение рассматриваемого показателя. Практический

интерес представляют прогнозы экстремальных показателей, которых могут существенно повлиять на надежность и безопасность проектируемых сооружений ПИ.

АЗРФ включает территории 4-х федеральных округов: Северо-Западного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного. На территории Северо-Западного федерального округа (СЗФО) расположено 15 МП [10]:

- Архангельская область – 3 (Архангельск, Мезень, Онега);
- Калининградская область – 1 (Калининград);
- Ленинградская область – 4 (Выборг, Высоцк, Приморск, Усть-Луга);
- Мурманская область – 3 (Витино, Кандакша, Мурманск);
- Ненецкий автономный округ – 2 (Варандей, Нарьян-Мар);
- г. Санкт-Петербург – 2 (Большой порт Санкт-Петербург, Пассажирский порт Санкт-Петербург).

В целом, на севере АЗРФ ожидаются благоприятные условия для морского судоходства в связи с уменьшением ледового покрова Белого и Баренцева морей и увеличением ежегодного периода с открытой водой, свободной ото льда, что будет определять удешевление морских перевозок в Арктике [7]. С другой стороны, разрушительная для ПИ повторяемость переходов температуры воздуха через 0°C к середине XXI века особенно возрастет на северо-западе РФ [7] и коснется портов Балтийского бассейна.

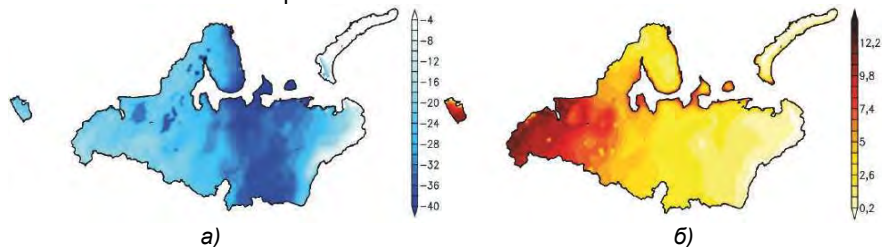
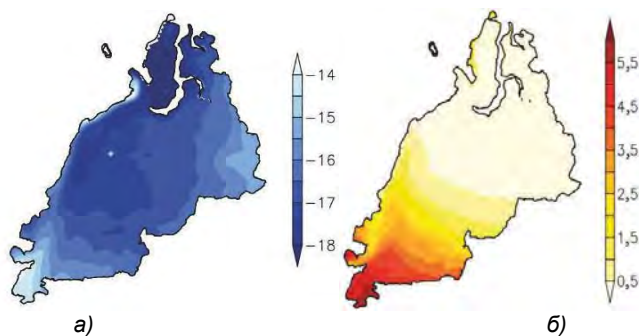


Рис. 2. Изменение климатических показателей на территории СЗФО: а) продолжительность отопительного периода (дни); б) число дней с переходом температуры воздуха через 0°C (дни) [7]

На территории Уральского федерального округа (УФО) расположен порт Сабетта (ЯНАО) [10]. Сокращение числа дней с температурой воздуха ниже -25°C приведет к уменьшению простоев в работе и положительно отразится на величине эксплуатационных расходов. Но ожидаемый рост количества зимних атмосферных осадков увеличит

повторяемость метелей, которые на территории Ямала могут продолжаться больше суток, затрудняя работу ПИ. Потепление сопровождается деградацией и увеличением средней глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлой породы, что понижает устойчивость ПИ и повышает расходы на ликвидацию возможного ущерба.



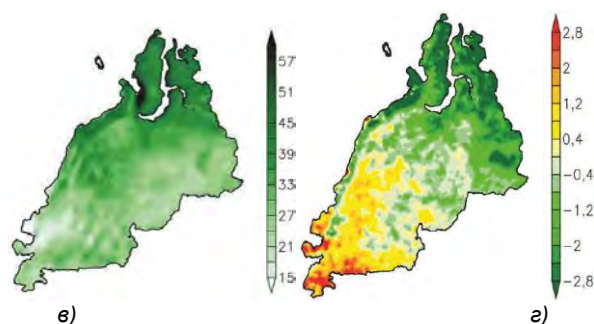


Рис. 3. Изменение климатических показателей на территории УФО: а) градусо-сутки отопительного периода (%); б) число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (дни); в) суточный максимум суммы осадков холодного сезона (%); г) максимальная продолжительность периода с суммой осадков менее 5 мм/сутки для теплого сезона (дни) [7]

На территории Сибирского федерального округа (СФО) расположено 3 МП: Диксон, Дудинка, Хатанга (Красноярский край) [10]. Основной проблемой для ПИ рассматриваемого региона станет увеличение

повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды, таких как, природные лесные пожары (Красноярский край), продолжительные и интенсивные метели (северные районы).

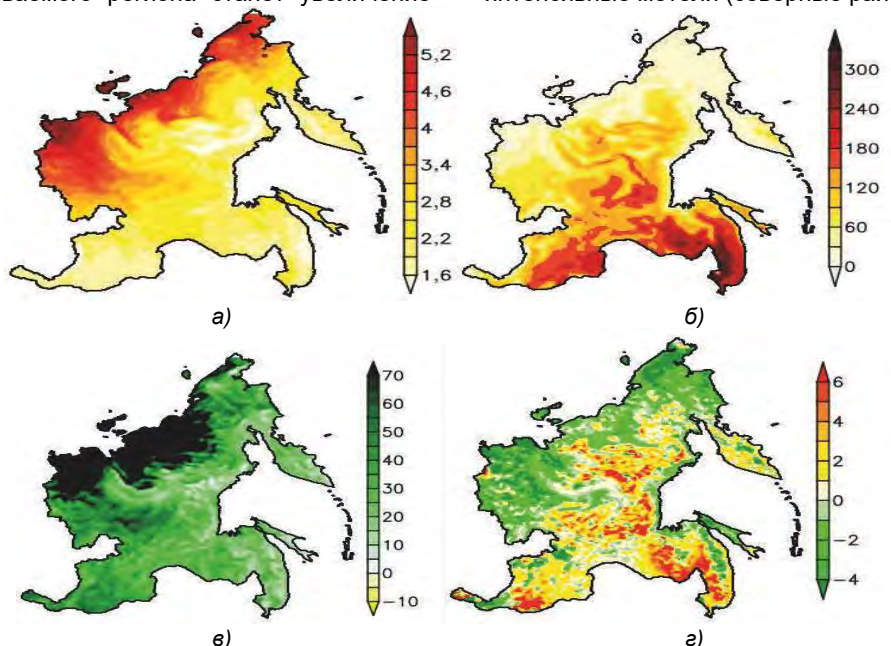
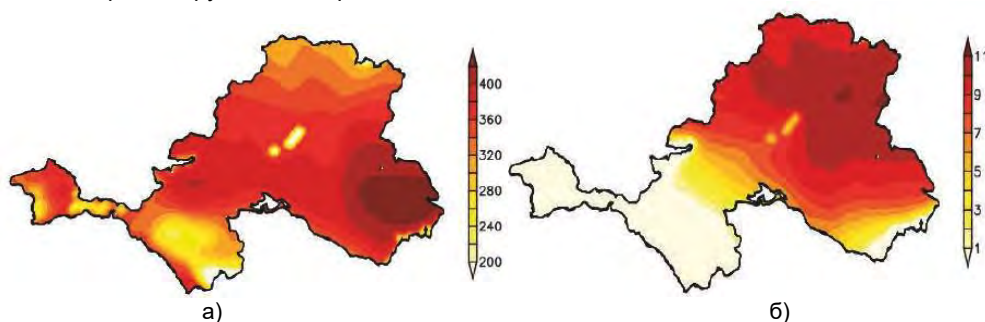


Рис. 5. Изменение климатических показателей на территории ДФО: а) средняя температура отопительного периода (°С); б) дефицит холода (°С·сут); в) суточный максимум сумм осадков холодного сезона (%); г) максимальная продолжительность непрерывного периода с суммами осадков менее 5 мм/сутки для теплого сезона (дни) [7]

В транспортном секторе ДФО рост температуры воздуха позволит увеличить грузооборот в арктических морях по СМП. Таяние многолетнемерзлых грунтов окажет негативное воздействие на ПИ. Значительное негативное влияние окажет и прогнозируемое к середине XXI

века увеличение максимальной интенсивности и суточного максимума осадков во влажные периоды как теплого, так и холодного периодов года. В холодный период возрастет повторяемость сильных снегопадов, которые, затрудняют работу ПИ.



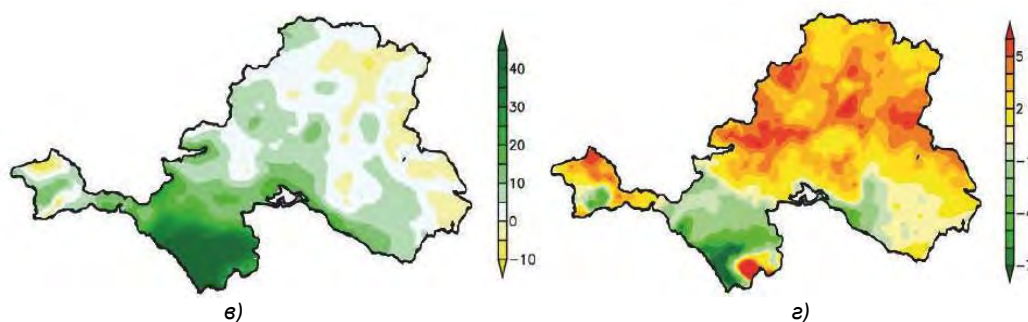


Рис. 6. Изменение климатических показателей на территории ЮФО: а) дефицит холода ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$); б) число дней с переходом температуры воздуха через 0°C (дни); в) суточный максимум суммы осадков теплого сезона (%); г) максимальная продолжительность (дни) периода с суммой осадков менее 1 мм/сутки (теплый сезон) [7]

Территория ДФО характеризуется высокой частотой и интенсивностью снегопадов на Сахалине, Курилах и Камчатке. Сильный ветер, характерный для прибрежных регионов ДФО, и обильные снегопады станут причиной увеличения повторяемости и интенсивности снежных заносов, которые также скажутся на работе ПИ. В будущем ИК приведет к более частым сильным ветрам и интенсивным штормовым волнениям на

дальневосточных морях. В теплый период значительные по масштабу и ущербу ливневые наводнения, вызванные тайфунами в Приморском крае, могут повредить операциям и товарам, перевозимым МТ. На дальневосточных морях можно ожидать увеличения повторяемости туманов в зимне-осенний период. К середине XXI века на Дальнем Востоке РФ возрастет повторяемость переходов температуры воздуха через 0°C [7].

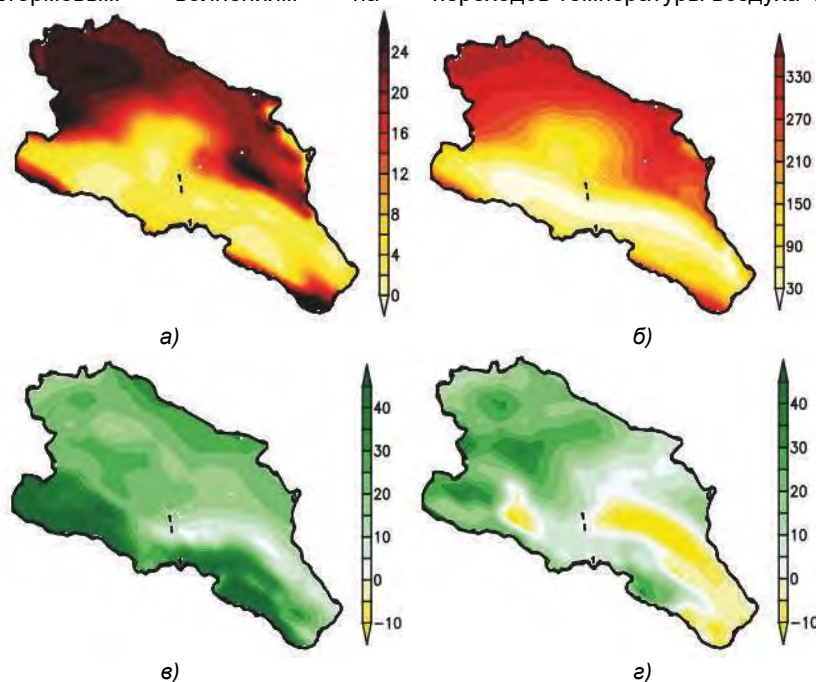


Рис. 7. Изменение климатических показателей на территории СКФО: а) число дней с суточной максимальной температурой воздуха выше $+30^{\circ}\text{C}$ (дни); б) дефицит холода ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$); в) суточный максимум суммы осадков холодного сезона (%); г) суточный максимум суммы осадков теплого сезона (%) [7]

На территории Южного федерального округа (ЮФО) расположен 21 МП [10]:

- Астраханская область – 2 (Астрахань, Оля);
- Донецкая Народная Республика – 1 (Мариуполь);
- Запорожская область – 1 (Бердянск);
- Краснодарский край – 9 (Анапа, Геленджик, Ейск, Кавказ, Новороссийск, Сочи, Тамань, Темрюк, Туапсе);
- Республика Крым – 4 (Евпатория, Керчь, Феодосия, Ялта);

– Ростовская область – 3 (Азов, Ростов-на-Дону, Таганрог);

– г. Севастополь – 1 (Севастополь).

Прогнозируемые повышения зимней температуры у поверхности и рост количества зимних осадков увеличат повторяемость образования гололедно-изморозевых отложений к середине XXI века. Особенно резко возрастет число дней с такими условиями в северных районах Ростовской области. На фоне прогнозируемого роста температуры, увеличения периодов без осадков и уменьшения осадков теплого периода на 5-10% к середине XXI века на всей территории ЮФО, за

исключением районов Черноморского побережья Кавказа (рис. 6), ожидается рост повторяемости пыльных бурь. Прогнозируемый рост максимальной суточной интенсивности осадков в Азовско-Черноморском регионе влечет за собой повышение вероятности ливневых наводнений и, как следствие, разрушение объектов ПИ. В будущем ИК приведет к более частым сильным ветрам и интенсивным штормовым волнениям на Черном и Азовском морях. Во второй половине XXI века уровень Черного и особенно Азовского морей может вырасти на 0,5-1,0 м. В то же время большие проблемы уже в настоящее время создают изменения уровня Каспийского моря.

На территории Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) расположен МП Махачкала (Республика Дагестан) [10]. Изменения уровня Каспийского моря, а также прогнозируемые изменения термического и влажностного режимов на территории СКФО будут оказывать негативное влияние на ПИ.

Подходы к адаптации морских портов к изменению климата

Опыт подготовки морских портов к изменению климата

Оценка рисков и связанных с ними мер повышения устойчивости портов к последствиям ИК - новый вопрос транспортной политики [9]. Обеспечению устойчивости МП к ИК уделялось намного меньше внимания, чем ИК из-за выбросов МТ. Мало информации об особенностях, последствиях и долгосрочных процессах ИК, необходимой для планирования подготовки конкретных портов и инвестиций. Например, отсутствуют надежные прогнозы в отношении повышения уровня моря по конкретным портам и побережьям, равно как и данные о закономерностях и интенсивности штормовых нагонов в конкретных местах. Поэтому большинство портов мира находятся лишь на начальных стадиях рассмотрения мер по адаптации к ИК.

В большинстве случаев крупные инфраструктурные проекты МП формируются на основе предположения о том, что экстремальные климатические явления происходят раз в столетие, тогда как сами проектируемые сооружения рассчитаны на несколько десятилетий. Поэтому в проектных решениях возможности экстремальных климатических явлений учитываются редко [9]. Это наиболее проблемные аспекты планирования ПИ, поскольку ИК приведет к сокращению периода повторяемости экстремальных явлений.

Лишь в немногих портах планируется осуществление проектов, например, по строительству новых волноломов или штормовых барьеров, которые позволят укрепить сооружения по защите от наводнений и разрушительных волн. Следует отметить, что номенклатура связанных с ИК

рисков для конкретных МП, по сути, мало чем отличается от номенклатуры исторически существующих рисков. Однако уровень рисков будет повышаться с ИК.

Например, процесс оценки устойчивости МП Австралии к ИК был разбит на 6 этапов: этап 0 – организационный; этап 1 – определение условий, в которых функционирует порт; этап 2 – определение текущих факторов уязвимости и будущих рисков; этап 3 – анализ и оценка рисков; этап 4 – определение приоритетов вариантов адаптации; этап 5 – мониторинг и оценка мер адаптации [9].

Определены меры адаптации МП к ИК, открывающие, в качестве дополнительных выгод, возможности для совершенствования логистических потоков, управления жизненными циклами объектов ПИ и уменьшения потенциальных рисков (таблица 3). Установлено, что наращивание потенциала адаптации к ИК требует развития организационных возможностей эффективного реагирования на проблемы, возникающие в процессе ИК, включая информационно-разъяснительную работу, повышение квалификации, сбор данных, мониторинг и исследования.

Практические шаги адаптации включают планирование организационно-технических и технологических мероприятий, совершенствование управления и страхования МП. В частности, следует адаптировать к ИК инженерно-технические решения, технологии эксплуатации и использования расходных материалов, условия предоставления услуг, надежность, своевременность, безопасность и комфорт пассажиров, обслуживание, погрузку и разгрузку грузов.

Например, ветровая нагрузка может быть снижена путем строительства постоянных ветрозащитных стен вдоль пристаней или использования уложенных штабелем контейнеров. Как показала практика, уложенные штабелем контейнеры на высоту до 13–15 м позволяют почти на 25% снизить скорость ветра и почти на 30% ветровую нагрузку [9].

В ряде МП уже приняты меры адаптации. Например, разработана программа адаптации порта Роттердама к последствиям ИК. При этом новые элементы ПИ должны быть устойчивы к ИК. Оценка их устойчивости включает оценку рисков, в которой учитываются вероятности возможных последствий ИК.

Разработан план смягчения последствий ИК для порта Сан-Диего. Для этого проводится детальное изучение связанных с ИК рисков (например, долгосрочного и краткосрочного повышения уровня моря, изменений волнового режима, которые могут повлиять на проникновение длинных волн внутрь порта, и изменения стока и режимов образования донных отложений). При этом мероприятия по оценке рисков ИК интегрированы в процесс пространственного планирования МП.

Таблица 3

Меры адаптации подсистем портов Австралии к ИК

Подсистема	Меры адаптации подсистемы МП к ИК
Технологическая	Целевое инвестирование в технологии, например, в разработку кранов, способных безопасно работать при сильных порывах ветра
	Новые спецификации холодильного хранения, соответствующие более высоким температурным нагрузкам, с использованием менее энергоемких альтернатив
	Использование возобновляемой энергии, энергии с низким уровнем выбросов для предупреждения перебоев с энергоснабжением и роста расходов на энергообеспечение (такие решения уже реализуются: например, топливные ячейки для мобильных логистических элементов)
	Охлаждения грузов и фотоэлектрические элементы для зданий
Инженерная	Закупка оборудования (например, портовых погрузчиков, конвейерных лент, береговых кранов) требует оценки с учетом будущих условий эксплуатации
	Хранилища должны быть модернизированы с учетом будущих экстремальных явлений
	Оценка и модернизация дренажных систем с учетом повышения интенсивности осадков
	Постоянный гидрографический мониторинг для определения потребностей в дноуглубительных работах
	Создание более надежных систем (например, системы пылеподавления) с учетом возможного усиления ветров
	Постепенное усиление или реконструкция волноломов для защиты от повышения уровня моря и усиления волн
Организационно-техническая	Повышение высоты прокладки дорог, железнодорожных путей на территории морских портов на случай наводнений
	Поощрение, при необходимости, переориентации на другие виды транспорта с целью повышения устойчивости путем устранения зависимости от избыточных элементов системы снабжения
	Обеспечение учета ИК (например, изменения уровня моря, повышения уровня штормовых нагонов) в будущих проектных спецификациях всех элементов ПИ
	Обеспечение разработки для портов планов упреждающих действий по управлению инфраструктурой и активами, в которых учитывается срок службы активов
	Налаживание партнерства с городскими властями и логистическими системами снабжения с целью надлежащего планирования и проектирования связанных между собой логистических центров, устойчивых к ИК на региональном уровне
Страхование	Изучение возможностей диверсификации торговли за счет товаров, устойчивых к ИК
	Взаимодействие со страховыми компаниями для количественной оценки рисков и надлежащего страхования от рисков, которые невозможно устранить
Системы управления	Факторы ИК следует постепенно интегрировать в природоохранные системы, системы преодоления чрезвычайных ситуаций и управления рисками путем обновления отдельных элементов политики, организации учебных мероприятий по последствиям ИК в рамках текущей деятельности по подготовке кадров, определения подходящих стратегий и параметров для разных систем управления и регулярного обновления правовых элементов обеспечения соблюдения норм

Технология адаптации МП к ИК

Технология адаптации МП к ИК включает следующие базовые элементы:

- мониторинг и прогнозирование изменений погодно-климатических условий, включая стихийные бедствия и погодно-климатические аномалии;

- оценка рисков и определение приоритетов (ранжирование) рисков изменений погодно-климатических условий для ПИ в территориальном (пространственном) разрезе;

- разработка и реализация программ адаптации, направленных на защиту и повышение устойчивости портовых комплексов к реальным (актуальным) неблагоприятным последствиям ИК (наводнений, пожаров, других стихийных бедствий, волн тепла и холода; деградации многолетнемерзлых грунтов, абразии береговых зон);

- разработка и реализация образовательных и научных программ, обеспечивающих развитие базы данных и базы знаний в области географии, экологии, климата и социально-экономических

процессов с целью, в частности, повышения качества прогнозирования рисков и эффективности мер адаптации к ИК в рамках стратегического планирования развития МП.

Конкретное содержание технологии адаптации МП к ИК существенно зависит от особенностей природно-климатических условий, социально-экономического положения и ресурсной обеспеченности конкретных территорий. Адаптация МП к ИК может осуществляться поэтапно, главным образом в отношении ПИ, создаваемой в расчете на длительный срок службы. Сложнее адаптироваться к росту повторяемости опасных явлений, что требует разработки новых подходов к оценке климатических параметров, особенно на стадии проектирования.

При проектировании новых и реконструкции старых портовых сооружений целесообразно учитывать следующие соображения. В условиях ожидаемого увеличения повторяемости опасных явлений погоды (штормового волнения и сгонно-нагонных явлений), потребуется проведение дополнительных работ по укреплению (увеличению высоты) существующих волнозащитных сооружений в портах. В качестве средства защиты от штормовых нагонов, могут применяться защитные сооружения с воротами, закрывающимися при угрозе возникновения нагонов и интенсивного ветрового волнения. Пример такого рода - комплекс защитных сооружений через Невскую губу в районе Санкт-Петербурга. Хотя темпы роста среднего уровня моря на акваториях российских морей (кроме Каспийского) невелики, во второй половине XXI века, скорее всего, потребуется наращивание высоты причальных стенок, во избежание их затопления.

Для безопасного движения судов на подходах и в акваториях МП в сложных гидрометеорологических условиях целесообразно оборудовать порты и прилегающие к ним прибрежные акватории современными средствами слежения за

гидрометеорологической обстановкой (ветром, видимостью, волнением, уровнем моря, течениями). В мелководных районах с легкоподвижными донными отложениями (в частности, у восточного побережья Азовского моря) потребуются расширение парка земснарядов и других технических средств для дноуглубительных работ.

Заключение

Изменение климата влечет масштабные последствия для морского транспорта и портов. Приведенные в работе прогнозы изменений параметров климата в прибрежных федеральных округах Российской Федерации позволяют конкретизировать влияние и последствия ИК для расположенных там морских портов.

Необходима заблаговременная подготовка МП и их объектов инфраструктуры к изменению климата. Практические подходы к адаптации МП основаны на локальном прогнозировании ИК и опыте подготовки морских портов. При этом оцениваются связанные с ИК риски МП. Эти оценки рисков ИК должны быть интегрированы в процесс планирования развития МП.

Целесообразно дальнейшее развитие и внедрение информационных систем мониторинга состояния МП, например, в ИПТ РАН разработана концепция [11] и структура [12] интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути, в том числе и МП.

Наиболее эффективен комплексный подход к разработке мер адаптации ПИ и других подсистем МП к ИК, основанный на общей технологии адаптации МП к ИК. Практические шаги адаптации включают планирование организационно-технических и технологических мероприятий, совершенствование управления и страхования МП.

Литература

1. Ассоциация морских торговых портов. Материалы к Общему собранию (Конференции) членов Ассоциации морских торговых портов 28 марта 2024 года. Отчет о деятельности Ассоциации морских торговых портов (март 2023 – январь 2024) и приоритетных направлениях деятельности на предстоящий период. Санкт-Петербург. 2024 год
2. Малыгин И.Г., Гурлев И.В., Савушкин С.А., Макоско А.А., Мохов И.И., Еналеев А.К., Цвиркун А.Д., Цыганов В.В., Бородин В.А., Гавкалюк Б.В. Комплекс моделей для управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики в условиях изменения климата. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. – 122 с.
3. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. – СПб.: ИПТ РАН, 2016. – 216 с.
4. Савушкин С.А., Искоростинский А.И., Лемешкова А.В. Климатические причины железнодорожных аварий // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2023. – № 2(21). – С.19-24.
5. Савушкин С.А., Горбунов В.Г., Лемешкова А.В. Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2023. – № 2(21). – С.8-14.
6. Цыганов В.В., Бородин В.А., Савушкин С.А. Сценарии влияния изменения климата на железнодорожную инфраструктуру // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2023. – № 2(21). – С.3-8.
7. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. — Санкт-Петербург: Научно-технологические исследования, 2022. – 124 с.
8. Бордученко Ю.Л., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю., Аксёнов В.А. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т.1, №2(52). – С. 14-25.
9. Европейская экономическая комиссия ООН. Последствия изменения климата для международных транспортных сетей и адаптация к ним. – Нью-Йорк–Женева: ООН, 2013. – 248 с.

10. Официальный Интернет-ресурс Министерства транспорта Российской Федерации. https://mintrans.gov.ru/transport_of_russian/2.
11. Малыгин И.Г., Коновалов И.Н., Королев О.А. Развитие концепции Интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – Т.1, №4(62). – С. 134-142.
12. Малыгин И.Г., Коновалов И.Н. Структура интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1., №4(58). – С. 215-221.

References

1. Associaciya morskikh torgovykh portov. Materialy k Obshchemu sobraniyu (Konferencii) chlenov Associacii morskikh torgovykh portov 28 marta 2024 goda. Otchet o deyatelnosti Associacii morskikh torgovykh portov (mart 2023 – yanvar' 2024) i prioritnykh napravleniyah deyatelnosti na predstoyashchij period. [Association of Commercial Seaports. Materials for the General Meeting (Conference) of the members of the Association of Commercial Seaports on March 28, 2024. Report on the activities of the Association of Commercial Seaports (March 2023 – January 2024) and priority areas of activity for the coming period.] St. Petersburg, 2024
2. Malygin I.G., Gurlev I.V., Savushkin S. A., Makosko A.A., Mokhov I.I., Enaleev A.K., Tsvirkun A.D., Tsyganov V.V., Borodin V.A., Gavkalyuk B.V. Kompleks modelej dlya upravleniya strategicheskimi razvitiem transportnoj infrastruktury Sibiri, Dal'nego Vostoka i Rossijskoj Arktiki v usloviyah izmeneniya klimata. [A set of models for managing the strategic development of transport infrastructure in Siberia, the Far East and the Russian Arctic in the context of climate change.] SPb.: SPbU GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, IPT RAS, 2023. – 122 p.
3. Tsyganov V.V., Malygin I.G., Enaleev A.K., Savushkin S.A. Bol'shie transportnye sistemy: teoriya, metodologiya, razrabotka i ekspertiza. [Large transport systems: theory, methodology, development and expertise.] – St. Petersburg: IPT RAS, 2016. – 216 p.
4. Savushkin S.A., Iskorostinsky A.I., Lemeshkova A.V. Klimaticheskie prichiny zheleznodorozhnykh avari. [Climatic causes of railway accidents.] // ITNOW: Information technologies in science, education and management. – 2023. – № 2(21). – pp.19-24.
5. Savushkin S.A., Gorbunov V. G., Lemeshkova A.V. Metody ocenki stoimosti adaptacii zheleznodorozhnoj infrastruktury k izmeneniyu klimata. [Methods for estimating the cost of adapting railway infrastructure to climate change.] // ITNOW: Information technologies in science, education and management. – 2023. – № 2(21). – pp.8-14.
6. Tsyganov V.V., Borodin V.A., Savushkin S.A. Scenarii vliyaniya izmeneniya klimata na zheleznodorozhnyuyu infrastrukturu. [Scenarios of the impact of climate change on railway infrastructure.] // ITNOW: Information technologies in science, education and management. – 2023. – № 2(21). – pp.3-8.
7. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Tretij ocennochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii RF. Obshchee rezyume. [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary.] – St. Petersburg: High-tech technologies, 2022. – 124 p.
8. Borduchenko Yu.L., Malygin I.G., Kaminsky V.Yu., Aksenov V.A. The nuclear icebreaker fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. Challenges and prospects for the development of the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. – 2021. Vol.1, №2(52). – pp. 14-25.
9. The United Nations Economic Commission for Europe. Posledstviya izmeneniya klimata dlya mezhdunarodnykh transportnykh setej i adaptaciya k nim. [The effects of climate change on international transport networks and adaptation to them.] – New York–Geneva: UN, 2013. – 248 p.
10. The official Internet resource of the Ministry of Transport of the Russian Federation. https://mintrans.gov.ru/transport_of_russian/2.
11. Malygin I.G., Kononov I.N., Korolev O.A. Development of the concept of an intelligent environmental safety system of the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. – 2023. – Vol.1, № 4(62). – P. 134-142.
12. Malygin I.G., Kononov I.N. The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route // Marine intellectual technologies. – 2022. – Vol.1, № 4(58). – P. 215-221.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: malygin_com@mail.ru

Цыганов Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: tsyganov_v_v@mail.ru

Савушкин Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: ssavushkin@mail.ru

Vladimir V. Tsyganov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: tsyganov_v_v@mail.ru

Sergey A. Savushkin, Ph.D. (Phys & Math), Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: ssavushkin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.04.2024.

Научная статья

УДК 519.876.2, 004.89

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.026>

Проектирование морских интеллектуальных транспортных систем, опирающихся на показатели устройств обработки информации

Лукомская О.Ю.¹ luol@mail.ru, Бородина О.В.¹ borodinaov@gmail.com, Шаталова Н.В.¹ shatillen@mail.ru

¹ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Цифровые проекты, к которым относится и проект НТИ «Цифровая верфь», строятся на математических моделях принятия решений по управлению когерентностью движения. Модели по управлению когерентностью движения судов на каналах судопропуска являются предметом исследования.

В работе описаны методы современной теории автоматического управления по расчёту критериев абсолютной устойчивости нелинейных систем, а именно метод фазового пространства и метод гармонического баланса.

Прибор управления движением судна работает в двух режимах – реальном времени и в режиме счисления. В математической модели движения необходимо заложить разностное уравнение в таком виде, что его можно будет использовать для программирования контроллера вектора направления движения, а именно, путевой вектор смещения: курс и скорость с учётом внешних воздействий.

Одноконтурные системы устройств промышленного интернета вещей состоят из нелинейного безынерционного преобразователя и линейной динамической части и обладают единичной отрицательной обратной связью. Вид связи нелинейного безынерционного преобразователя с линейной частью модели влияет на выбор вида корректирующей обратной связи модели.

Предложена и доказана способность линеаризации модели расчёта амплитуды преобразователя системы устройств управления на судоходно-шлюзовом канале нейронной сетью. Для детектирования амплитуды гармонического сигнала в предыдущих работах создана сеть Элмана, которым генерируется сигнал входа. Создана искусственная нейронная сеть Хопфилда с четырьмя устойчивыми точками, генерирующая решение модели управления. Решение задачи определения параметров шлюзования или настройки нелинейной части модели выполнено.

Ключевые слова: транспортные системы, искусственный интеллект, цифровая верфь, когерентный режим, управление движением, нелинейные модели, безынерционный преобразователь, нейронные сети.

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

Для цитирования: Лукомская О.Ю., Бородина О.В., Шаталова Н.В. Проектирование морских интеллектуальных транспортных систем, опирающихся на показатели устройств обработки информации, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 232—241. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.026

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.026>

Design of marine intelligent transport systems based on the performance of information processing devices

Olga Yu. Lukomskaya¹ luol@mail.ru, Olga V. Borodina¹ borodinaov@gmail.com,

Natalya V. Shatalova¹ shatillen@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Digital projects, which include “Digital Shipyard” project, are built on mathematical models of decision-making for managing motion coherence. Models for managing the coherence of vessel traffic on shipping channels are the subject of research.

The current work describes methods of modern automatic control theory for calculating criteria for the absolute stability of nonlinear systems, namely the phase space method and the harmonic balance method.

The vessel motion control device operates in two modes - real time and dead reckoning mode. In the mathematical model of movement, it is necessary to include a difference equation in such a form that it can be used to program the controller of the movement direction vector, namely, the displacement path vector: course and speed, taking into account external influences.

Single-loop systems of industrial Internet of things devices consist of a nonlinear inertia-free converter and a linear dynamic part and have a single negative feedback. It is the type of connection between the nonlinear inertia-free converter and the linear part of the model influences the choice of the type of corrective feedback of the model.

The work proposes and proves the ability to linearize a model for calculating the amplitude of the transducer of a system of control devices on a shipping lock channel using a neural network. To detect the amplitude of a harmonic signal, previous works have created an Elman network, which generates an input signal. In the current work, an artificial

Hopfield neural network with four stable points is created generates a solution to the control model. The solution to the problem of determining the gateway parameters or setting up the nonlinear part of the model is been completed.

Keywords: transport systems, artificial intelligence, digital shipyard, coherent mode, motion control, nonlinear models, inertia-free converter, neural network.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Olga Yu. Lukomskaya, Olga V. Borodina, Natalya V. Shatalova Design of marine intelligent transport systems based on the performance of information processing devices, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 232—241. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.026

Введение

Проблема управления устройствами промышленного интернета вещей под задачи морских интеллектуальных транспортных систем (МИТС) заключается в выработке математических моделей принятия решений по управлению данными, получаемыми с устройств обработки информации.

Проект «Цифровая верфь» предполагает использование устройств обработки информации, получаемой от объектов МИТС. Объектами управления МИТС являются суда, проходящие через шлюзовые устройства.

Модели обработки транспортной информации, получаемой от устройств, влияют на выбор когерентного режима эксплуатации судов в каналах судопропуска. Изучение сложности и нелинейности моделей принятия решений по управлению движением в каналах судопропуска являются проблемой, решаемой в том числе в данной статье.

Цифровое проектирование представляет собой совокупность технологий (рис. 1), используемых в интеллектуальных морских транспортных системах. По оценкам [1] рынок цифрового проектирования и моделирования в России до 2025 ожидает до 14,8 в 2025 году.

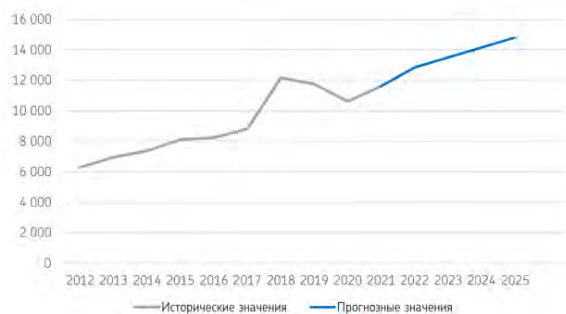


Рис. 1. Прогноз развития российского рынка цифрового проектирования и моделирования до 2025 года (млн руб.)

По данным [1] цифровое проектирование представляет собой совокупность технологий, используемых в интеллектуальных морских транспортных системах:

- компьютерное проектирование (Computer-Aided Design, CAD);
- компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE; High Performance Computing, HPC) и оптимизация (Computer-Aided Optimization, CAO);
- технологическая подготовка производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM), в том числе нового поколения, ориентированная на аддитивное

производство (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM);

– бионический / генеративный дизайн ((Simulation & Optimization) – Oriven Bionic/Generative Odesign);

– цифровые двойники (Digital Twin);

– технологии управления данными о продукте (Product Oata Management, POM);

– технологии управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM).

Транспортные средства стали центром развертывания Интернета вещей, поскольку сетевое соединение, доступность и производительность технологий улучшились, а затраты снизились. В самолетах, поездах, автомобилях и кораблях датчики используются на всех этапах — от проектирования до продаж, от ежедневного использования до текущего обслуживания и ремонта.

Эти датчики предназначены не только для отправки предупреждений водителям, но и для выполнения автоматических действий, таких как торможение, чтобы сделать вождение более безопасным [2].

Цифровые двойники, как важный этап интеллектуального проектирования логистической инфраструктуры морских портов строится на основе технологии промышленного интернета вещей (Iot), который представляет собой экосистему сенсорных датчиков и устройств обработки информации [3].

Объект исследования

Система судопропуска внутренних водных путей, как открытая транспортная система включает в себя: транспортные средства (ТС): лайнеры, суда, парусники, паромы, танкеры и пр., личный, пассажирский муниципальный / коммерческий транспорт – аквабусы; транспортные коммуникации: каналы, реки, водохранилища, подходящие морские пути; телекоммуникационные средства связи: радиостанции, навигационное оборудование; транспортные узлы обслуживания: порты, вокзалы, шлюзы, пристани, рейды; систему принятия решений по диспетчеризации транспортных средств.

МИТС в целом и системы принятия решений по диспетчеризации ТС, в частности, моделируются на данных с сенсорных устройств, расположенных в каналах, шлюзовых системах судопропуска и алгоритмах обработки информации.

Технико-метрические показатели трасс судопропуска [4-7] являются входными параметрами моделирования $u(t)$, относительно каждой точки (судна) на виртуальной карте цифрового канала судопропуска: среднестатистическое время шлюзования конкретного судна; расстояния между

узлами обслуживания судна; допустимые и расчетные скорости движения судна; время движения судна между узлами обслуживания; коэффициенты распределения приоритетов в обслуживании.

Решения по управлению движением описаны [4–8]. Модель цифрового двойника канала шлюзования имеет цель найти параметры $y(t)$ нелинейной динамической модели, и характеристики системы $x_{in}(t_{ij})$ для каждого судна, стоящего в очереди на обслуживание в судоходном канале.

Научный задел

Стратегии судопропуска и формализация задачи выбора когерентного режима рассмотрены в работах [4–11] о выявлении нетехнологических простоев судов в водном канале судопропуска со шлюзами.

При моделировании морских интеллектуальных транспортно-логистических систем на внутреннем водном транспорте существует задача предопределения «особых точек» на кривой транспортного процесса в судоходных шлюзованных каналах, к ним относятся нетехнологические стоянки судов. Нетехнологические простои судов можно прогнозировать по формулам (1–5):

$$y_k = \frac{q}{2(p-q)} * G_k V, \quad (1)$$

$$V = p * \frac{G_v}{G_v + (2n - G) * \frac{p-q}{p}}, \quad (2)$$

$$G = \frac{Dp}{p} + \frac{Dq}{q}, \quad (3)$$

$$G_k = G - \frac{p+q}{pq} * R, \quad (4)$$

$$G_v = \frac{Dq}{q} + \frac{q}{p} * \frac{Dp}{p} - 2 \frac{R}{p}, \quad (5)$$

где y_k – среднее число судов, задержанных на нетехнологических операциях; V – вероятность занятости шлюза процессом шлюзования (технологической операцией); q – частота (интенсивность) прибытия судов на шлюзы; p – пропускная способность канала (частота обслуживания судов на шлюзах), ($q < p$); p – нагрузка на транспортную сеть; Dp, Dq, R – дисперсии частот обслуживания и прибытия судов на шлюзы соответственно и их ковариация; n – число одновременно работающих на подъем и спуск шлюзов n (например, $n=1$, при двух – $n=2$); G, G_k, G_v – динамические частоты судопропуска, судов и шлюзов соответственно.

Рассчитаем показатели транспортных потоков (дисперсии частот и периодов), а также дисперсии самих периодов. Примем за период наступления шлюзований T , а DT – за их дисперсию. Тогда частоту шлюзований p и их дисперсию Dp определим по формулам (6–8):

$$p = \frac{y^*}{T}, \quad (6)$$

$$Dp = \frac{y^{*2} * DT}{T^2 * (T^2 + DT)}, \quad (7)$$

$$pT = y^*, \quad (8)$$

где, соблюдая размерность и дискретность величин, $y^*=1440$, мин./сут.; T – период наступления шлюзований, мин., p – частота, которая характеризуется числом шлюзований в сутки [12].

Формулы (6–8) позволяют вырабатывать различные стратегии управления шлюзованием судов, движущихся во встречных транспортных потоках.

Так линейные задачи расчёта параметров моделирования процесса обслуживания судов при необходимости приоритизации в обслуживании одного из двух ТС, движущихся в разных направлениях, заключаются в расчётах времени задержки обслуживания и темпорального зазора между движущимися ТС.

Рассмотрим каждую из трех вариантов стратегий [13,14] пропуска судов через шлюзы внутренних водных путей:

1. Учитывая очередность пропуска судов в разных направлениях, сформулируем задачу:

$$y = \frac{q}{2(p-q)} * G_k * V, \quad (9)$$

$$\begin{cases} y_1 = \frac{q_1}{2(p_1 - q_1)} * G_{k1} * V_1 \\ y_2 = \frac{q_2}{2(p_2 - q_2)} * G_{k2} * V_2 \end{cases}, \quad (10)$$

где характеристики в направлении «1» или «2» помечены соответствующим индексом, без индексов – суммарные характеристики.

При приоритетности в узлах обслуживания по потоку «1» непроизводительные простои судов будут такими как в (11):

$$\begin{cases} y_1 = y_1 \\ y_2 = y - y_1 \end{cases}, \quad (11)$$

2. В качестве альтернативной стратегии обратный вариант предполагает другие задержки в обслуживании шлюзами (12):

$$\begin{cases} y_2 = y_2 \\ y_1 = y - y_2 \end{cases}, \quad (12)$$

Выбор варианта очередности обслуживания судов с наименьшими задержками связан с расчетом разности последних и ранговой цене судов в разнонаправленных потоках.

3. Третья стратегия управления судопропуском судов предполагает наличие «темпорального зазора» для временного регулирования частоты обслуживания шлюзом судов в зависимости от номинальной пропускной способности шлюза.

Исходя из пропорционального режима управления [12], с учетом усредненных показателей отклонений частот реального и номинального процесса обслуживания, коэффициентом пропорциональности можно управлять.

Используя коэффициент корреляции частот γ и при коэффициенте пропорционального управления [13,14] $b=0$, при малых «темпоральных зазорах», когда интенсивность и пропускная способность ($q \sim p$) примерно равны, возникают задержки в ожидании шлюзования. Простои судов минимизируются при условии (13):

$$\frac{bp}{q} = 1. \quad (13)$$

При согласованности транспортного процесса имеют место согласования частот прибытия и обслуживания ($\gamma = 1$), простои судов исчезают [13]. Подобный режим работы транспортной системы является когерентным или резонансным и, например, при светофорном регулировании автомобильного потока называется «зеленая волна».

Научный задел существует в виде линейных моделей прогнозирования процессов шлюзования для различных стратегий, таких как выбор когерентного режима или согласование частот обслуживания (13); выстраивание очередей обслуживания (12) и расчёт непроизводительных простоев (9-11). Коэффициент пропорциональности имеет прямое влияние на скорость движения конкретного судна, с которой оно стремится сократить темпоральный зазор канала судопропуска для равномерного распределения всех остальных судов в канале шлюзования.

Постановка задачи

Построение систем управления движением судов по водным коммуникациям на основе линейных моделей несомненно упрощает применение устройств в проектах морских интеллектуальных систем (МИТС). Однако линейность представления транспортных систем, претерпевающих воздействия внешних возмущений, утопична. Математические модели сложных открытых систем, таких как МИТ должны быть нелинейными.

Экология МИТС заключается в сочетании приборов промышленного интернета (IoT), опирающаяся на показатели скорости движения судна в канале и на подходе к нему. Задача данного исследования – показать процесс линеаризации нелинейной системы управления пропорциональностью занятия конкретным морским судном ресурсов канала шлюзования.

Скорость сложность и точность информации, получаемой с сенсоров можно программировать на различных платформах посредством языка C++ и/или в приложении Qt4 framework [4,5]. Встраивание в экосистему МИТС подобных устройств имеет минусы в виде уникальности прибора (LOQ, МСР и т.д.). Уникальность прибора управления скоростью судна для оптимизации времени занятия канала судопропуска всеми остальными судами проявляется в виде обратной связи, придающей IoT устройству вид системы управления по типу МСР.

Таким образом, задача заключается в моделировании нелинейной математической модели компонента системы МИТС, - устройство сбора и обработки информации о скоростях морских судов, обслуживаемых в канале судопропуска.

Под нелинейными автоматическими системами понимаем системы стабилизации и автоматического управления, программные средства и следящие системы, а также электронные расчётно-решающие устройства, работающие по компенсаторному принципу [4], динамические свойства которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

Гипотезу, которую попытаемся защитить в данной работе это метод линеаризации нелинейной системы управления путём ввода регуляторной составляющей в виде матричной МАФХ, рассчитываемой нейронными сетями. Сложность моделирования нелинейных динамических систем заключается в отыскании границ устойчивости, что и является задачей данного исследования.

Использование моделей нелинейной динамики в проектировании МИТС позволит выстраивать экосистему приборов согласно концепции организации движения и с уверенностью, что получаемый на выходе модели результат обладает достоверностью.

Модель устройства управления скоростью корабля, обслуживаемого в канале судопропуска

Современные автоматизированные системы управления каналами судопропуска на технологии промышленного интернета это одноконтурные экосистемы IoT устройств, которые состоят из нелинейного безынерционного преобразователя (НБП) и линейной динамической части (ЛДЧ), обладают единичной отрицательной обратной связью (рис. 2).

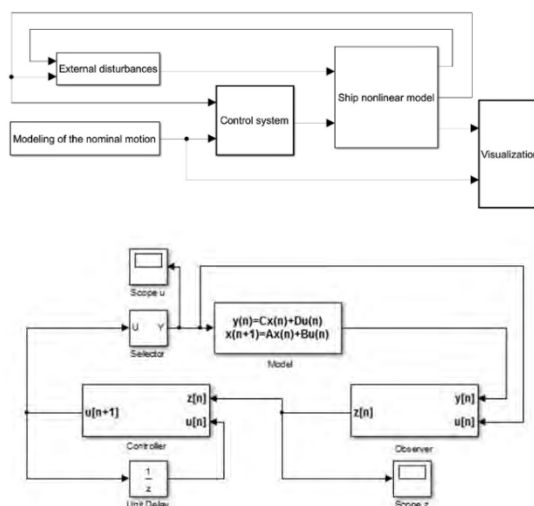


Рис. 2. Автоматизированные системы управления каналами судопропуска на технологии промышленного интернета

Описание модели устройства управления скоростью корабля, обслуживаемого в канале судопропуска является одним из множества IoT устройств в сети (рис. 2). Суть интеллектуализации канала судопропуска заключается в оснащении подобным прибором потенциальных кораблей для формирования аутентичных сигналов управления со всех устройств сети.

Формируемая математическая модель управления скоростью одного корабля в рамках поставленной задачи является дискретной. Роль асимптотического наблюдателем, принимающим на вход вектор измерений y и управление u , выполняет блок Observer. Сигнал управления формируется блоком Controller, на вход которого подаётся не только вектор оценки состояния системы z , но и вектор управления u , построенный на предыдущем шаге в блоке Observer.

На вход блок Observer принимает только два из трех параметров системы: текущую скорость морского судна в канале шлюзования, которая передаётся с бортовых систем корабля и силу тока. С помощью асимптотического наблюдателя получаем оценки вектора состояния модели. Задача данной работы заключается именно в описании математической модели асимптотического наблюдателя.

Блок Observer является асимптотическим наблюдателем, модель его устойчивости будет выработана ниже, а блок Controller – регулятором, в качестве которого предлагается использовать нейросеть.

Определение границ устойчивости нечеткой модели устройства

Однако основная проблема использования в математических моделях транспортных систем уравнений нелинейной динамики это расчёт/определение устойчивости движения системы в пространстве допустимых на конкретное время значений (устойчивости).

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

$$\dot{y}(t) = g(x(t), u(t), t)$$

где $u(t)$ это вход в систему; $y(t)$ вывод, характеристика системы (положение точки) $x(t)$.

Существует два больших направления в изучении движения нелинейных систем: точные методы и приближенные. К точным относят частотные методы, такие как, например, метод Ляпунова [4]. К приближенным относят метод линеаризации обратной связи, который работает если движение точки минимально.

Вероятнее всего нелинейность МИТС будет неоднозначной или гистерезисной, то есть входная характеристика системы увеличивается по одной зависимости, а изменяется характеристика по другой зависимости [15-17]. Главной характеристикой нелинейной системы является определение областей неустойчивости, которое можно выполнить двумя основными методами: методом фазового пространства и методом гармонического баланса.

Анализировать процессы в одноконтурной системе, состоящей из нелинейного безынерционного преобразователя (НБП) и линейной динамической части (ЛДЧ) с единичной отрицательной обратной связью методом фазового пространства.

Фазовым пространством называется множество точек, в которых может оказаться система при воздействии на неё допустимыми возмущениями. Основы теории фазового пространства нелинейных систем закладывались работами: А. Пуанкаре, И.

Бендиксона, А.А. Андропова, Р.А. Нелепина, Н.В. Бутенина, Ю.И. Неймарка, Н.А. Фуфаева.

К частотным критериям абсолютной устойчивости нелинейных систем относят критерий Попова-Найквиста. Автор формулировки критерия В.М. Попов, который сформулировал его в 1959 г. И опубликовал в научном журнале «Автоматика и телемеханика» в 1961 г. Критерий определяет достаточное условие абсолютной асимптотической устойчивости замкнутой одноконтурной системы с единичной отрицательной обратной связью, которая содержит в прямом тракте линейную стационарную динамическую часть и соединенный последовательно с ней нелинейный безынерционный преобразователь с однозначной/многозначной стационарной или нестационарной характеристикой.

Практическое использование критерия В.М. Попова:

- в комплексной плоскости строится МАФХ линейной части;

- проводится касательная к МАФХ в точке, выбранной так, чтобы касательная пересекала левую вещественную полуось максимально близко к началу координат; эта точка и наклон касательной определяют ограничения на возможную нелинейность (K, q) , при которых гарантируется устойчивость замкнутой системы;

- если параметр q определен типом характеристики НБП, то тем самым предельный *статический коэффициент наклона* фиксируется однозначно.

Устойчивость замкнутой нелинейной системы гарантируется, если статический коэффициент наклона характеристики нелинейного элемента не превосходит:

$$K \leq 1,85 \text{ для любого типа нелинейности } (q = 0)$$

$$K \leq 1,98 \text{ для стандартных нелинейностей } (q > 0)$$

В формулировке критерия абсолютной устойчивости нелинейных систем В.М. Попова [18,19] прослеживается влияние критерия Найквиста для линейных систем. Их общие черты:

- оба являются *частотными* критериями, использующими амплитудно-фазовую характеристику (АФХ) *разомкнутой системы*; замкнутый контур образуется единичной отрицательной обратной связью;

- в оценке устойчивости особая роль отводится точке $(-1/K; j0)$ в комплексной плоскости;

для линейных систем $K = 1,0$.

Но есть и различия:

- критерий Найквиста определяет только одну запретную точку комплексной плоскости, критерий В.М. Попова – целую область, ограниченную прямой линией, проходящую через эту точку;

- критерий Найквиста формулирует необходимые и достаточные условия устойчивости, а критерий В.М. Попова – только достаточные.

Расширенный критерий В.М. Попова позволяет определить, при каких условиях в системе обеспечивается заданный темп затухания процессов. Чтобы удовлетворялось требование абсолютной устойчивости линейной части:

$$\left(\begin{array}{l} \text{если } \int_0^{\infty} u_1^2(t) dt \neq 0, \text{ то } \int_0^{\infty} y_1^2(t) dt \neq 0 \end{array} \right),$$

использовать следует новую АФХ $H_1(j\omega) = H(j\omega - a)$. Критерий при этом имеет вид:

$$\operatorname{Re}[(1 + j\omega q)H(j\omega - a)] + 1/K \geq 0.$$

Таким образом методом фазового пространства проведен анализ процессов в одноконтурной системе, состоящей из нелинейного безынерционного преобразователя (НБП) и линейной динамической части (ЛДЧ) с единичной отрицательной обратной связью. Метод фазового пространство использовался как способ определения критерия устойчивости.

Линеаризация нелинейного частотного преобразователя модели цифрового канала судопропуска

Коррекция нелинейных систем предполагает изменение структуры и параметров линейной динамической части системы таким образом, чтобы обеспечивались устойчивость и определенное качество замкнутой системы при заданной характеристике НБП, вид которой существенно влияет на выбор корректирующих связей. Общее требование – использовать возможность пересечения линий

$$H(j\omega) \text{ и } -N^{-1}(\bar{x}).$$

Система управления на судоходно-шлюзовом канале может быть линеаризована, в этом случае оптимизацию функции управления можно рассматривать с точки зрения учета эквивалентного детерминированного воздействия (в математической модели) неизменяемой части системы:

$$\dot{x} = Ax + Bu + CF(t).$$

Соответственно, функция Гамильтона содержит дополнительное слагаемое:

$$H = \psi^T Ax + \psi^T Bu + \psi^T CF(t) - 0,5(x^T \lambda_x x + u^T \lambda_u u),$$

но не меняются выражение для закона управления:

$$u(t) = \lambda_u^{-1} B^T \psi(t)$$

и сопряженное уравнение.

Поэтому оптимальное движение линейной системы должно удовлетворять решению двух матричных уравнений:

$$\dot{x} = Ax + B\lambda_u^{-1} B^T \psi(t) + CF(t)$$

$$\dot{\psi} = \lambda_x x - A^T \psi,$$

которые образуют систему из $2n$ линейных неоднородных дифференциальных уравнений с граничными условиями $x(0)=0$ и $x(\infty)=0$.

Решение такой системы уравнений содержит свободные и вынужденные составляющие. Последние при дробно-рациональных спектрах случайных узкополосных возмущений образуются экспоненциальными функциями комплексных частот эквивалентного детерминированного воздействия

$$x_{ib}(t) = \sum_{k=1}^m \dot{X}_{ik} \exp s_k t$$

$$\psi_{ib}(t) = \sum_{k=1}^m \dot{\Psi}_{ik} \exp s_k t,$$

где X_{ik} и Ψ_{ik} – комплексные амплитуды частных решений системы основных и сопряженных уравнений.

Таким образом, каждая из устойчивых экстремалей

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^m \dot{X}_{ik} \exp s_k t + \sum_{k=1}^n C_k \Delta_{li}(p_k) \exp p_k t;$$

$$\psi_i(t) = \sum_{k=1}^m \dot{\Psi}_{ik} \exp s_k t + \sum_{k=1}^n C_k \Delta_{l(n+i)}(p_k) \exp p_k t;$$

содержит $n+m$ элементарных экспоненциальных функций.

Регулятор состояния в общем случае не может обеспечить изменение переменных состояния системы согласно этим экстремалам, т.к. у него не хватает степеней свободы. Это легко показать с помощью соотношений, которые связывают параметры обратных связей произвольного канала управления с экстремалами:

$$\lambda_{uj} \sum_{i=1}^n g_{ji} x_i(t) = \sum_{i=1}^n b_{ij} \psi_i(t), \quad j = 1..r$$

$$\begin{aligned} \lambda_{uj} \sum_{i=1}^n g_{ji} \left(\sum_{k=1}^m \dot{X}_{ik} \exp s_k t + \sum_{k=1}^n C_k \Delta_{li}(p_k) \exp p_k t \right) = \\ = \sum_{i=1}^n b_{ij} \left(\sum_{k=1}^m \dot{\Psi}_{ik} \exp s_k t + \sum_{k=1}^n C_k \Delta_{l(n+i)}(p_k) \exp p_k t \right) \end{aligned}$$

и, следовательно, должны выполняться условия:

$$\lambda_{uj} \sum_{i=1}^n g_{ji} \Delta_{li}(p_k) = \sum_{i=1}^n b_{ij} \Delta_{l(n+i)}(p_k), \quad k = 1..n$$

$$\lambda_{uj} \sum_{i=1}^n g_{ji} \dot{X}_{ik}(p_k) = \sum_{i=1}^n b_{ij} \dot{\Psi}_{ik}, \quad k = 1..m,$$

количество которых превосходит число неизвестных элементов j – строки матрицы G .

Требуется другой регулятор, у которого число обратных связей в канале больше n . Их смысл – ввести в закон управления информацию о свойствах возмущения. При формулировании математической модели нелинейной динамической системы IoT устройства использовался наблюдатель расширенного состояния в сочетании с линеаризацией обратной связью для устранения проблем с неточностями в математической модели при синтезе управления скоростью корабля, обслуживаемого в канале шлюзования.

Искусственная нейронная сеть как регуляторное звено

В исследовании [20] рассмотрен подход к решению задачи комплексирования навигационной информации, поступающей от инерциальной и спутниковой системы. Комплексирование выполняется на основе фильтра Калмана.

Для фильтрации шумовых погрешностей процесса и измерений предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС). ИНС рассматривается как регулятор стабилизации судна на курсе в контуре управления. Результаты проверки работоспособности нейросетевых регулирующих устройств позволяют судить об их эффективности и робастности к изменениям условий движения судна. Использование нейронных сетей также возможно для построения информационных систем, позволяющих прогнозировать параметры движения конкретного судна в режиме реального времени или элементы его циркуляции в статическом режиме.

Апробация

Пусть задан набор из эталонов многомерных векторов и требуется построить сеть, входом которой является вектор x , а выходом является вектор похожий на эталонный. Изменение координат вектора на выходе является функцией исходных данных от входящего вектора и функции активации. Построение данной матрицы рассматриваем как цель создания ассоциативной памяти нелинейного элемента системы управления.

Решено применять рекуррентные, то есть обладающей обратной связью, нейронные однослойные сети Хопфилда (рис.3). Решение поставленной задачи выполнено посредством написания на языке C++ кода создания рекуррентной нейронной сети Хопфилда во фреймворке Qt4.

Как видно из рисунка 3, сеть обеспечила переход к устойчивому состоянию. Продолжением работы следует считать исследования устойчивости решения от количества точек равновесия. Большое количество точек равновесия влияет на влияющей на количество итераций вычисления матрицы состояний сети. сложность вычисления функции управления.

Заключение

Работа, посвященная цифровому проектированию, которое представляет собой совокупность технологий, используемых в интеллектуальных морских транспортных системах. Следует обозначить этапы проектирования нелинейных моделей морских интеллектуальных транспортных систем:

1. Формализация нелинейной модели системы принятия решений по управлению процессом или разработка математической модели нелинейной безынерционной части системы управления каналом судопропуска.
2. Выбор способа связи нелинейной части модели с функцией управления или выработка метода линеаризации динамической части модели.
3. Создание нейросетевых моделей управления связями линейной и нелинейной частей или программирование матрицы связи векторов на входе и выходе системы управления.

В текущей работе создана искусственная нейронная сеть Хопфилда с четырьмя устойчивыми точками. Доказано на примерах, что среднеквадратическая ошибка, изменение градиента функции изменения скорости обучения стремятся к нулю, за время, составляющее 4 эпохи.

Решение задачи определения доверительных интервалов параметров шлюзования и настройки нелинейной части модели за счёт применения нейросетей выполнена.

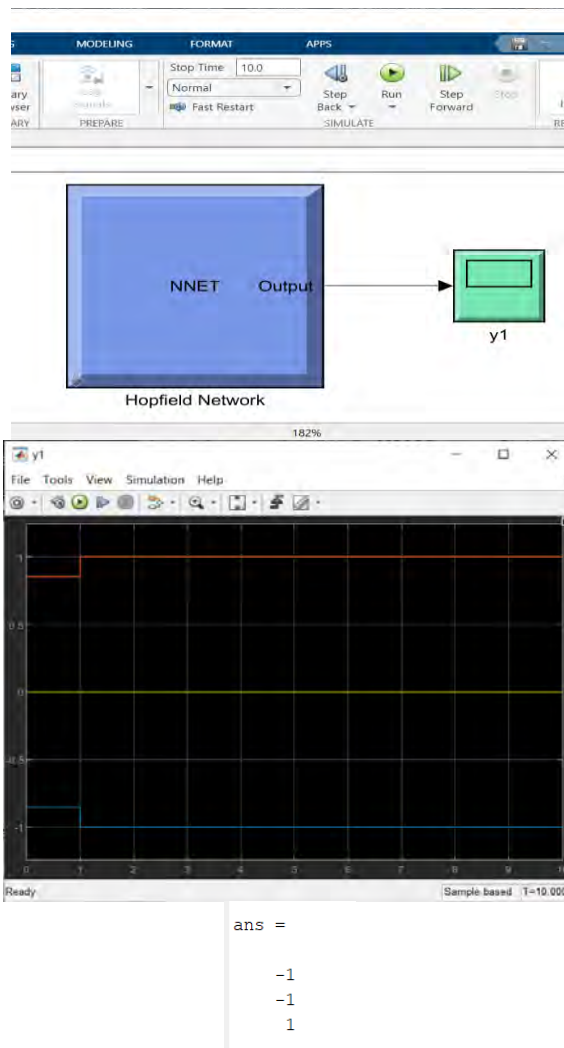


Рис.3. а) схема сети Хопфилда; б) выходной сигнал; в) итоговое состояние

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в планы научных работ ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук и выполняемых за счет средств федерального бюджета по теме «Разработка основ теории интеллектуального управления в транспортно-логистических системах» (FFZU-2024-0001).

Литература

1. Michael Chui, Mark Collins, Mark Patel. The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity. McKinsey & Company. November 2021. URL: <https://www.mckinsey.com/~the-internet-of-things-catching-up-to-an-accelerating-opportunity-final.pdf> (01.02.2023).
2. Проект развития рынков, включенных в направление «Технет». НТИ. 2022. URL: <https://technet-nti.ru/article/ic-na-baze-associacii> (дата обращения 01.01.2023).

3. Boyes, Hugh, Hallaq, Bilal, Cunningham, Joe and Watson, Tim (2018). The industrial internet of things (IoT): an analysis framework. *Computers in Industry*, 101. pp. 1-12.
4. Лукомская О.Ю., Лукомский Ю.А. О проблемах моделирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений по диспетчеризации транспортных потоков судов на внутренних водных путях // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2020. – № 3-1(49). – С. 180-186.
5. Лукомская О.Ю., Лукомский Ю.А., Шаталова Н.В. Разработка основных принципов моделирования процессов формирования и обслуживания встречных транспортных потоков когнитивной транспортной системы внутренних водных путей // *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 3-1 (57). С. 220-227.
6. Самойлов В.А., Дюенко Д.В. Возможность применения нейронных сетей для поиска и решения потенциальных конфликтных ситуаций между воздушными судами при полетах в верхнем воздушном пространстве // *Транспорт России: проблемы и перспективы* – 2022: материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН. 2019. Т. 1. – С. 180-184.
7. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 500 с.
8. Лукомский Ю.А., Стариченков А.Л., Модин Н.В. Системы управления движением судна с применением нейросетевых технологий // *Транспорт России: проблемы и перспективы* – 2019: материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН. 2019. Т. 1. – С. 336-340.
9. Числов К.А. Нейроподобный алгоритм коррекции безгироскопной инерциально-спутниковой гравиметрической системы // *Информатика и системы управления*. 2013. № 4 (38). С. 093-099.
10. Jwo D.J., Chen J.J. Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS. *INS navigation system design. Proceedings of IFAC Workshop «Adaptation and learning in control and signal processing»*. 2007. P. 7.
11. Nguyen-H.M., Zhou C. Improving GPS / INS Integration through Neural Networks. *Journal of Telecommunications*. 2010. V. 2 (2). P. 1-6.
12. Kaygisiz B.H., Erkmen I., Erkmen A.M. GPS / INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network. *Journal of Navigation*. 2004. V. 57, № 2. P. 297-310.
13. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks. *Ocean Engineering*. 2003. V. 30, № 13. P. 1669-1697.
14. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis. *Artificial Neural Networks Application: Doktor-Ing. genehmigte Dissertation*, Institute of Ship Technology und Transport Systems, Germany. 2007. P. 156.
15. Ning W., Dan W., Tieshan L. A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks. *Control Conference (CCC), 2012. 31st Chinese. IEEE, 2012. P. 7026-7031.*
16. Valcic M., Antonic R., Tomas V. Anfis Based Model for Ship Speed Prediction. *Brodo Gradnja*. 2011. V. 62, № 4. P. 373-382
17. Липкович М.М., Фрадков А.Л. О необходимости критерия Попова для существования специальной функции Ляпунова у систем с несколькими нелинейностями // *Автоматика и телемеханика*. – 2015. – № 5. – С. 90-99.
18. Липкович М.М. Критерий Попова для систем с несколькими комплекснозначными нелинейностями // *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого): материалы XIII Международной конференции*. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2016. – С. 243-245.
19. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления. – М.: ЛЕНАНД, 2019. 500 с.
20. Лазарев В.Л. Робастное управление в биотехнологической промышленности. – СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. 196 с.

References

1. Michael Chui, Mark Collins, Mark Patel. The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity // *McKinsey & Company*. November 2021. URL: <https://www.mckinsey.com/~the-internet-of-things-catching-up-to-an-accelerating-opportunity-final.pdf> (01.02.2023).
2. Proekt razvitiya rynkov, vklyuchennyh v napravlenie «Tekhnet» [Project for the development of markets included in the Technet direction]. NTI. 2022. URL: <https://technet-nti.ru/article/ic-na-baze-associacii> (data obrashcheniya 01.01.2023).
3. Boyes, Hugh, Hallaq, Bilal, Cunningham, Joe and Watson, Tim (2018). The industrial internet of things (IoT): an analysis framework. *Computers in Industry*, 101. P. 1-12.
4. Lukomskaya O.YU., Lukomskij YU.A. O problemah modelirovaniya intellektual'noj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij po dispetcherizacii transportnyh potokov sudov na vnutrennih vodnyh putyah [On the problems of modeling an intelligent decision support system for dispatching traffic flows of vessels on inland waterways]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020. № 3.1(49). S. 180-186.
5. Lukomskaya O.YU., Lukomskij YU.A., SHatalova N.V. Razrabotka osnovnyh principov modelirovaniya processov formirovaniya i obsluzhivaniya vstrechnykh transportnyh potokov kognitivnoj transportnoj sistemy vnutrennih vodnyh putej [Development of basic principles for modeling the processes of formation and servicing of oncoming traffic flows of a cognitive transport system of inland waterways]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2022. № 3-1 (57). S. 220-227.
6. Samojlov V.A., Doenko D.V. Vozmozhnost' primeneniya nejronnyh setej dlya poiska i resheniya potencial'nyh konfliktnykh situacij mezhdv vozduzhnymi sudami pri poletah v verhnem vozduzhnom prostranstve [The ability to use neural networks to search for and resolve potential conflict situations between aircraft when flying in upper

- airspace]. Transport Rossii: problemy i perspektivy (2022): materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb.: IPT RAN. 2019. T. 1. S. 180-184.
7. Polyak B.T., Hlebnikov M.V., Rapoport L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie [Mathematical theory of automatic control]. M.: LENAND, 2019, 500 s.
 8. Lukomskij YU.A., Starichenkov A.L., Modin N.V. Sistemy upravleniya dvizheniem sudna s primeneniem nejrosetevykh tekhnologij [Vessel motion control systems using neural network technologies]. Transport Rossii: problemy i perspektivy (2019): materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb.: IPT RAN. 2019. T. 1. S. 336-340.
 9. CHislov K.A. Nejropodobnyj algoritm korrekcii bezgiroskopnoj inercial'no-sputnikovoj gravimetricheskoy sistemy [Neuro-like correction algorithm for a gyroscope-free inertial-satellite gravimetric system]. Informatika i sistemy upravleniya. 2013. N 4 (38). S. 093-099.
 10. Jwo D.J., Chen J.J. Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS. INS navigation system design. Proceedings of IFAC Workshop «Adaptation and learning in control and signal processing». 2007. P. 7.
 11. Nguyen-H.M., Zhou C. Improving GPS / INS Integration through Neural Networks. Journal of Telecommunications. 2010. V. 2 (2). P. 1-6.
 12. Kaygisiz B.H., Erkmen I., Erkmen A.M. GPS / INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network. Journal of Navigation. 2004. V. 57, N 2. P. 297-310.
 13. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks. Ocean Engineering. 2003. V. 30, N 13. P. 1669-1697.
 14. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis. Artificial Neural Networks Application: Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems, Germany. 2007. P. 156.
 15. Ning W., Dan W., Tieshan L. A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks. Control Conference (CCC), 2012. 31st Chinese. IEEE, 2012. P. 7026-7031.
 16. Valcic M., Antonic R., Tomas V. Anfis Based Model for Ship Speed Prediction // Brodo Gradnja. 2011. V. 62, N 4. P. 373-382
 17. Lipkovich M.M., Fradkov A.L. O neobходимosti kriteriya Popova dlya sushchestvovaniya special'noj funkcii Lyapunova u sistem s neskol'kimi nelinejnostyami [On the necessity of the Popov criterion for the existence of a special Lyapunov function for systems with several nonlinearities]. Avtomatika i telemekhanika. 2015. N 5. S. 90-99.
 18. Lipkovich M.M. Kriterij Popova dlya sistem s neskol'kimi kompleksnoznachnymi nelinejnostyami [Popov's criterion for systems with several complex-valued nonlinearities]. Ustojchivost' i kolebaniya nelinejnykh sistem upravleniya (konferenciya Pyatnickogo): materialy XIII Mezhdunarodnoj konferencii. Moskva: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2016. S. 243-245.
 19. Polyak B.T., Hlebnikov M.V., Rapoport L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Mathematical theory of automatic control]. M.: LENAND, 2019. 500 s.
 20. Lazarev V.L. Robastnoe upravlenie v biotekhnologicheskoy promyshlennosti [Robust control in the biotechnology industry]. SPb.: Universitet ITMO; IHiBT, 2015. 196 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

Лукомская Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: luol@mail.ru

Olga Y. Lukomskaya, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: luol@mail.ru

Бородина Ольга Владимировна, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Шаталова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, , Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shatillen@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 06.05.2024.

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.027>

Оценка технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования (ПТО) с использованием нечеткой логики

Аблязов Э.К.¹ amigab@mail.ru, Аблязов К.А.¹ kiril123@bk.ru¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова

Аннотация. В статье предлагаются методы оценки технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования (ПТО) в эксплуатационных условиях с использованием математического аппарата теории нечетких множеств. Исследованы способы задания функций принадлежности в нечеткой логике скоростей конвейерной ленты и конвейерных питателей. Графически показана оценка работоспособности конвейерной ленты при нарушении ее скоростного режима по алгоритму нечеткого вывода Мамдани. На основе структурной схема диагностирования ПТО разработана нечеткая модель оценки технического состояния ПТО и алгоритм применения аппарата нечетких множеств как обобщенной модели контроля технического состояния ПТО. Приведен обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода для контроля технического состояния ПТО. Представлена блок-схема алгоритма экспертного оценивания для разработки базы правил системы нечеткого вывода.

Ключевые слова: нечеткое множество, функция принадлежности, трапециевидная функция принадлежности, треугольная функция принадлежности, техническое состояние, работоспособность, экспертная оценка.

Для цитирования: Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования (ПТО) с использованием нечеткой логики, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 242—251. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.027

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.027>

Assessment of the technical condition of the port lifting and transport equipment (LTE) using fuzzy logic

Emil K. Ablyazov¹ amigab@mail.ru, Kemal A. Ablyazov¹ kiril123@bk.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Russian Federation

Annotation. The article proposes methods for assessing the technical condition of port lifting and transport equipment (LTE) in operational conditions using the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets. The methods of setting the membership functions in the fuzzy logic of conveyor belt speeds and conveyor feeders are investigated. Graphically, an assessment of the operability of a conveyor belt in violation of its speed limit is shown using the Mamdani fuzzy inference algorithm. Based on the block diagram of the diagnosis of LTE, a fuzzy model for assessing the technical condition of LTE and an algorithm for using the fuzzy sets apparatus as a generalized model for monitoring the technical condition of LTE have been developed. A generalized algorithm for selecting a suitable fuzzy inference model for monitoring the technical condition of the LTE is presented. A flowchart of an expert evaluation algorithm for developing a rule base for a fuzzy inference system is presented.

Keywords: fuzzy set, membership function, trapezoidal membership function, triangular membership function, technical condition, operability, expert assessment.

For citation: Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov, Assessment of the technical condition of the port lifting and transport equipment (LTE) using fuzzy logic, Marine intelligent technologies. 2024. № 2 part 1, P. 242—251. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.027

Введение

В практике эксплуатации портовых ПТО нет строгого определения надежной техники, устаревшего оборудования, ограничения скорости, грузоподъемности и др. Так, например, отказ (согласно ГОСТ 27.002-2015) определяется как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния. Он может быть «полным» или «частичным», а это порождает нечеткость в измерении надежности в числе отказов. Существующие искусственные границы существенно снижают возможности анализа: если грузоподъемность портального крана равна 3000 кг, то кран может снабжаться сменным оборудованием – грейфером для работы с насыпными грузами, а

если грузоподъемность составляет 2999, то следует ли его относить только для работы с крюками? Если электрическое реле срабатывает за 0,15 сек, то следует ли его считать неисправным при срабатывании за 0,16 сек? Если допускается ток приводного электродвигателя 200А в течение 1 минуты, то произойдет ли его отказ через 1 минуту и 1 секунду? Если установлена нормальная эксплуатационная скорость движения конвейерной ленты 2,0 м/с, то будет ли нарушение эксплуатационного режима при скорости меньше или больше 2,0 м/с? Таким образом, пороговые ограничения приводят к логическим парадоксам и искусственным ограничениям в определении надежности ПТО. В зарубежной литературе данная проблематика освещалась в работах многих

исследователей [1-9]. В этих трудах предлагаются новые методы нечеткой оценки надежности, так как нечеткие множества являются важным фактором развития теории надежности в последние десятилетия. Их вклад в устранение возможности ошибок, недостаточности данных, случайности или нечеткости как в системе, так и в накоплении каких-либо данных для соответствующей системы, что упускается из виду при традиционной оценке надежности, представляется весьма важным. Статистическое исследование объектов нечисловой природы является одной из парадигм современной статистики [10], наряду с непараметрической статистикой. В процессе работы с непараметрической статистикой и анализе объектов нечисловой природы немаловажную роль играют нечеткие множества [11].

Цель и задачи

Сложность оценок технического состояния ПТО и отдельных объектов заключается в неполноте и неопределённости ретроспективных данных по их параметрам и режимам функционирования. Использование математического аппарата теории нечётких множеств позволяет наилучшим образом структурировать все то, что разделено не очень точными границами [12]. Диагностика технического состояния ПТО проводится с целью определения его работоспособности. Набор контролируемых и диагностических параметров объекта ПТО может быть большим. Задача сводится к оценке технического состояния объекта ПТО (работоспособен или неработоспособен) по полученным значениям диагностических параметров. В работе для оценки технического состояния объекта ПТО предлагается использовать методы нечеткой логики.

Материалы и методы

В работах американского математика Л. Заде [13, 14] и российского ученого Рыжова А.П. [15] были введены понятия «нечеткая логика» и «нечеткие множества» (FuzzyNets), позволившие производить исследование рассуждений в условиях нечёткости, размытости и делать заключения на неточных, не количественных, нечетких терминах. В теории нечетких множеств основным понятием является

собственно нечеткое множество A , которое задается множеством входящих в него элементов $x \in X$ и функцией принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$ этих элементов к множеству:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in X \}$$

Для нечетких множеств, как и для обычных, определены основные логические операции. Самыми основными, необходимыми для расчетов, являются пересечение и объединение. Пересечение двух нечетких множеств (нечеткое "И"): A и B : $f_{AB}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Объединение двух нечетких множеств (нечеткое "ИЛИ"): A и B : $f_{AB}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Значение $\mu_A(x) = 0$ означает отсутствие принадлежности к множеству, 1 – полную принадлежность.

Кроме нечетких множеств аппарат использует понятия нечеткой переменной и лингвистической переменной. Значениями лингвистической переменной могут быть нечеткие переменные и каждая лингвистическая переменная состоит из множества своих значений, которое также называется базовым терм-множеством T . Нечеткая переменная описывается набором (N, X, C) , где N — это название переменной, X — универсальное множество (область рассуждений), C — нечеткое множество на X .

Основой для проведения операций нечеткой логики является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме "Если-то" и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов. Они позволяют осуществлять нечеткие выводы. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- существует хотя бы одно правило для каждого лингвистического термина выходной переменной;
- для любого термина входной переменной имеется хотя бы одно правило, в котором этот терм используется в качестве предпосылки (левая часть правила).

В общем случае механизм логического вывода по Мамдани включает четыре этапа: введение нечеткости (фаззификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости, или дефаззификация (см. рис. 1) [16].



Рис. 1 - Система нечеткого логического вывода.

Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефаззификации. Система нечеткого логического вывода включает в себя следующую последовательность действий:

1. Процедура фаззификации: определяются степени истинности, т.е. значения функций принадлежности для левых частей каждого правила (предпосылок).
2. Нечеткий вывод. Сначала определяются уровни "отсечения" для левой части каждого из правил. Далее находят "усеченные" функции принадлежности.

3. Композиция, или объединение полученных усеченных функций, для чего используется максимальная композиция нечетких множеств.

4. Дефазификация, или приведение к четкости. Существует несколько методов дефазификации. Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом метода дефазификации. Наиболее распространенный способ логического вывода - вывод Мамдани или центроидный метод.

Геометрический смысл такого значения – центр тяжести для кривой $\mu_V(y)$. На рис. 3 графически показан процесс нечеткого вывода по Мамдани для входной переменной v_2 .

Для достижения необходимой производительности конвейерной транспортной системы, служащей для транспортировки сыпучих и навалочных грузов, необходимо, чтобы ленточные питатели подавали груз на сборный ленточный конвейер с определенной скоростью их движения. Дозировка либо подгонка конвейерной производительности под удельный вес транспортируемого груза может осуществляться путем изменения скорости вышеуказанных ленточных питателей. Ленточных питателей может быть несколько. В зависимости от их скорости конвейерная производительность, которая измеряется количеством транспортируемого груза в единицу времени, например, тонн в час, может быть или низкой, нормальной или высокой. При низкой скорости питателей конвейерная транспортная система не может достигнуть производительности, указанной в технической документации на систему, а при высокой скорости возможны следующие нарушения режима работы системы: пробуксовка конвейерной ленты на приводном барабане, перегруз электродвигателей приводных барабанов, сход конвейерной ленты, просыпание груза.

Проиллюстрируем это на примере. Требуется определить степень работоспособности конвейерной ленты принимающих груз с ленточных питателей, используя математический аппарат нечетких множеств. Обозначим множество возможных значений через V (область рассуждений), тогда в качестве v_1 будет выступать скорость ленточных питателей и в качестве v_2 скорость конвейерной ленты.

Рассмотрим способы задания функций принадлежности скоростей конвейерных питателей и конвейерной ленты.

Задание скорости питателей конвейерной ленты. Обозначим через v_1 скорость питателя, м/с, которая может принимать множество возможных значений $V: v_1 \in [0; 4]$. Предполагается, что предельные отклонения скорости от нормальной эксплуатационной скорости 2 м/с составляют $\pm 0,2$ м/с.

Рассмотрим процесс фазификации, т.е. нахождения значений функций принадлежности нечеткого множества V на основе не четких исходных данных. На этапе фазификации значения входных параметров приводятся в соответствие с их нечеткими лингвистическими переменными с последующим выбором закона изменения функции принадлежности [17]. При формировании функций принадлежности надо стремиться к тому, чтобы степени принадлежности границ интервала крайним термам были равны единице. В этом случае выполняется естественное правило: чем меньше

(больше) значение переменной, тем в большей степени он соответствует крайнему терму "очень низкий" ("очень высокий") [17]. В качестве лингвистической переменной в данном случае будет скорость питателя v_1 . Для функций принадлежности, соответствующих соседним термам t_i и t_{i+1} , максимум одной должен совпадать с минимумом другой, а точка пересечения соответствовать точке перехода [18].

Базовое терм-множество V будет состоять из трех лингвистических термов: «НИЗКАЯ» - $v_1 \leq 1,8$; «НОРМА» - $1,8 \leq v_1 \leq 2,2$; «ВЫСОКАЯ» - $v_1 \geq 2,2$. В этом случае выполняется следующее правило: чем меньше (больше) значение переменной v_1 , тем в большей степени оно соответствует крайнему терму «НИЗКАЯ» («ВЫСОКАЯ») [17]. При формировании функции принадлежности будем стремиться к тому, чтобы она была равна единице при значении переменной $v=2,0$. Функции принадлежности, задаваемых термами «НИЗКАЯ» и «ВЫСОКАЯ», определим отдельными отрезками кусочно-линейных функций. Совместное использование различных функций принадлежности позволяет описать лингвистическую переменную скорость питателя v_1 . Совокупность функций принадлежности для каждого терма из базового терм-множества V изображают вместе на одном графике [18]. Построим функции принадлежности для каждого лингвистического терма из базового терм-множества V . Треугольная функция принадлежности приемлемо описывает терм «НОРМА» - $1,8 \leq v_1 \leq 2,2$ и задается следующей аналитической формулой:

$$\mu(v_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{если } x \geq c \end{cases},$$

где $a=1,8$ м/с, $b=2,0$ м/с, $c=2,2$ м/с.

Параметры треугольной функции принадлежности в этом случае будут интерпретироваться так: $[a, c]$ - диапазон изменения переменной; b – наиболее возможное значение переменной. При $(b-a)=(c-b)$ имеем случай симметричной треугольной функции принадлежности, которая может быть однозначно задана двумя параметрами из тройки (a, b, c) . Для задания функций принадлежности крайних термов - «НИЗКАЯ» и «ВЫСОКАЯ» используем функции принадлежности, задаваемых отдельными отрезками (кусочно-линейными функциями). Так для терма «НИЗКАЯ» задаем функцию принадлежности при помощи соотношения:

$$\mu(v_1) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0, & \text{если } a_2 < x \end{cases}.$$

Для терма «ВЫСОКАЯ» задаем функцию принадлежности при помощи соотношения:

$$\mu(v_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & \text{если } a_2 < x \end{cases}$$

При задании значений a_1 и a_2 будем исходить из того, что функции принадлежности, соответствующих

соседним термам максимум одной должен совпадать с минимумом другой, а точка пересечения соответствовать точке перехода. Построим функции принадлежности для каждого лингвистического терма из базового терм-множества V . С учетом всех выше перечисленных условий на рис. 1 представлены функции принадлежности переменной v_1 . Совокупность функций принадлежности для каждого терма из базового терм-множества V обычно изображаются вместе на одном графике.



Рис. 2 – Треугольная функция принадлежности переменной v_1

Задание скорости конвейерной ленты транспортной системы. Пусть нормальная скорость конвейерной ленты составляет $1,8 \leq v_2 \leq 2,1$. Причем заданы недопустимая минимальная скорость меньше 1,6 м/с и недопустимая максимальная скорость больше 2,3 м/с.

При формировании функции принадлежности будем стремиться к тому, чтобы она была равна единице при значении переменной [17]. Трапецевидная функция принадлежности приемлемо описывает такие изменения переменной v_2 и задается следующей аналитической формулой:

$$\mu(v_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & \text{если } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{если } b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & \text{если } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{если } d \leq x \end{cases}$$

где $a=1,6$ м/с, $b=1,8$ м/с, $c=2,1$ м/с, $d=2,3$ м/с.

Параметры трапецевидной функцией принадлежности интерпретируются в нашем случае так: интервал $[a, d]$ — диапазон изменения переменной (носитель нечеткого множества); интервал $[b, c]$ — диапазон наиболее возможных значений переменной. В качестве лингвистической переменной в данном случае будет скорость конвейерной ленты v_2 . Сформируем для нее базовое

терм-множество, которое будет состоять из трех нечетких переменных и лингвистическую оценку значения переменной v_2 будем производить с помощью трех лингвистических термов: «НИЗКАЯ» - $v_2 \leq 1,6$; «НОРМА» - $1,6 \leq v_2 \leq 2,3$; «ВЫСОКАЯ» - $v_2 \geq 2,3$. В этом случае выполняется следующее правило: чем меньше (больше) значение переменной v_2 , тем в большей степени оно соответствует крайнему терму «НИЗКАЯ» («ВЫСОКАЯ»). Задание функций принадлежности термов «НИЗКАЯ» («ВЫСОКАЯ») происходит аналогично, что и при задании этих термов в треугольной форме принадлежности. С учетом всех выше перечисленных условий на рис. 3, а, б, в, г представлены функции принадлежности переменной v_2 и графическое выполнение нечеткого логического вывода при значении переменной $v_2=2,16$. Достоверность терма «НИЗКАЯ» в этом случае будет равняться 0, терма «НОРМА» - α_1 , терма «ВЫСОКАЯ» - α_2 (рис. 3, в). Весь диапазон возможных значений выходной переменной функциями принадлежности разобьем на две части – «низкая» и «норма», которые представлены треугольником и трапецией (см. рис. 3, б). Удельный вес трапецевидной выходной функции принадлежности доминирует над удельным весом треугольной функции принадлежности в нашем случае. В общем случае эффективность и точность нечетких множеств термов выходной лингвистической переменной u зависит от полноты продукционных правил, составленных специалистом-экспертом и от его опыта и интуиции.

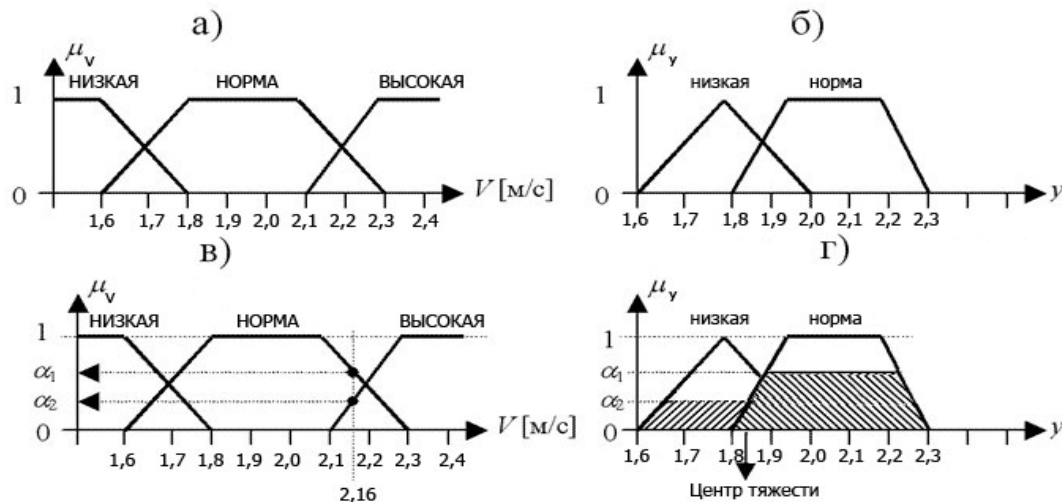


Рис. 3 – Функции принадлежности переменной v_2 и графическое выполнение нечеткого логического вывода при значении переменной $v_2=2,16$.

Для нахождения интегрального четкого вывода воспользуемся алгоритмом нечеткого вывода Мамдани. Полагаем, для простоты, что база знаний системы состоит из двух нечетких правил: П1: если v_2 есть НОРМА, то y есть норма; П2: если v_2 есть ВЫСОКАЯ, то y есть низкая, где v_2 – имя входной переменной, y – имя переменной вывода; НОРМА, норма, ВЫСОКАЯ, низкая – лингвистические значения с соответствующими функциями принадлежности. При этом четкое значение вывода Y^* определяется на основе приведенных правил и значения входной переменной $v_2=2,16$.

Алгоритм Мамдани следующий:

1. Находятся степени истинности для предпосылок каждого правила: $\mu_A(2,16)$, $\mu_B(2,16)$, где А и В – лингвистические значения («НОРМА» и «ВЫСОКАЯ») с соответствующими функциями принадлежности.

2. Осуществляем логический вывод:

Находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого правила с использованием операции $\min$
 $\alpha_1 = \min\{\mu_A(2,16)\}$, $\alpha_2 = \min\{\mu_B(2,16)\}$.

Затем находятся функции принадлежности

$$\mu_1(y) = \min\{\alpha_1, \mu_C(y)\} \text{ и } \mu_2(y) = \min\{\alpha_2, \mu_D(y)\},$$

где С и D лингвистические значения «норма» и «низкая».

3. Композиция. Соотношения выше определяют нечеткие множества, представляющие допустимые выводы, соответствующие правилам П1 и П2. Для получения интегрального вывода, удовлетворяющего оба правила, строится объединение

$$\mu'(y) = \max\{\mu_C(y), \mu_D(y)\} = \max\{\min[\alpha_1, \mu_C(y)], \min[\alpha_2, \mu_D(y)]\}.$$

4. Деффагификация. Решением уравнений $\alpha_1 = \mu_C(y)$ и $\alpha_2 = \mu_D(y)$ определяются четкие значения вывода y_1^* и y_2^* для каждого из правил П1 и П2. Интегральный четкий вывод находится как средневзвешенное $\mu_C(y)$ и $\mu_D(y)$:

$$y^* = (\alpha_1 y_1^* + \alpha_2 y_2^*) / (\alpha_1 + \alpha_2).$$

Для случая нарушения скоростного режима конвейерной ленты численные значения $\alpha_1=0,6$, $\alpha_2=0,3$, $y_1^*=1,89$ и $y_2^*=1,67$ берем с графика (см. рис.3). Вычисляем интегральный четкий вывод:

$$y^* = (\alpha_1 y_1^* + \alpha_2 y_2^*) / (\alpha_1 + \alpha_2) = (0,6 \cdot 1,89 + 0,3 \cdot 1,67) / (0,6 + 0,3) = 1,82,$$

что соответствует нормальной скорости конвейерной ленты.

В общем случае интегральный четкий вывод определяется из выражения:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Можно деффагификацию провести методом центра тяжести. Идея этого метода состоит в том, что функцию принадлежности рассматривают как систему материальных точек, массы которых равны значениям функции принадлежности. Известно, что координата центра тяжести является обобщенной характеристикой системы материальных точек. Для дискретных функций центр тяжести вычисляется по соотношению [18].

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}.$$

В этом случае интегральный четкий вывод скорости конвейерной ленты будет определяться результатом деффагификации, то есть получением реальной величины скорости по выходному значению «центр тяжести».

Таким образом, основой для проведения операций нечеткой логики является база правил и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов. Они позволяют при построении осуществлять нечеткие выводы.

Результаты

В материалах и методах были рассмотрены применение нечеткой логики для задания функций принадлежности скоростей конвейерных питателей и конвейерной ленты. В случае большого количества

диагностических параметров необходимо воспользоваться методикой, предложенной ниже.

Техническое состояние (ТС) объекта ПТО зависит от ТС составных ее систем (см. рис.4). В свою очередь ТС ПТО зависит от технического состояния отдельных устройств и сборочных единиц, входящих в него. Поэтому необходимо процесс определения технического состояния составных частей объекта

ПТО определять техническим диагностированием. Диагностирование объекта ПТО в целом, ее систем и сборочных единиц должно проводиться в определенной последовательности. На рис. 4 условно представлен процесс диагностирования объекта ПТО, который условно можно разделить на пять уровней (цифрами обозначены номера уровней).



Рис. 4 – Структурная схема диагностирования технического состояния объекта ПТО

Первый уровень включает общее диагностирование объекта ПТО по выходным параметрам, оценивающим техническое состояние двигателя, трансмиссии, движителя, рабочего оборудования и систем (например, расход топлива, производительность и тяговая мощность). На втором уровне диагностируются двигатель, электрооборудование, трансмиссия, движитель, рабочее оборудование и системы машины. В третий уровень диагностирования включены сборочные единицы, приборы и системы двигателя, трансмиссии, движителя, рабочего оборудования. Четвертый уровень включает диагностирование подвижных сопряжений. На последнем уровне рассматриваются отдельные детали. Предлагаемая последовательность диагностирования позволяет уменьшить трудоемкость выявления неисправностей и прогнозирования работоспособности объекта ПТО. Согласно структурной схеме диагностирования ТС объекта ПТО, что на рис. 4 представлен 1-ым уровнем, будет определяться ТС всех составляющих, входящих во второй уровень. В свою очередь ТС 2-ых уровней определяется ТС уровней с третьего по пятый. В дальнейшем вместо ПТО будем подразумевать объект ПТО.

Подход нечеткой оценки ТС ПТО. О техническом состоянии ПТО можно судить по значениям диагностических параметров n , которые образуют матрицу Y , элементы которой y_{ij} – результат i -того наблюдения по j -му параметру; $i=1, \dots, k$, $j=1, \dots, n$ (k – объем наблюдений, n – число диагностических параметров (ДП)). Между ДП ПТО и его техническим состоянием существует зависимость – при одних значениях параметров ПТО работоспособен, при других – неработоспособен. ТС ПТО описывается

вектором Z , принимающем значение 1, если ПТО работоспособен, и 0 при неработоспособном ПТО. Задача сводится к оценке ТС ПТО (работоспособен или неработоспособен) по заданным значениям ДП [19].

Алгоритм применения аппарата нечетких множеств как обобщенной модели контроля ТС ПТО состоит из следующих этапов:

1. Описание ДП ПТО (входных переменных). Входной лингвистической переменной присваивается нечеткий терм «удовлетворительно», если регистрируемое значение ДП ПТО находится в интервале допустимых значений. Если значение ДП выходит за допустимые интервалы, то лингвистическая переменная принимает значение «неудовлетворительно». Допустимые значения ДП определяются на основе экспертных оценок.

Для описания термов лингвистической переменной ДП ПТО вводятся функции принадлежности. Переменная выхода Z , описывающая ТС ПТО, задается двумя нечеткими термами: «работоспособен» и «неработоспособен».

2. Формируется база правил с использованием нечетких высказываний вида: «Если ..., то...». Логика составления базы правил следующая: если значение хотя бы одного ДП выходит за интервалы допустимых значений, то диагностируется неработоспособное состояние ПТО, если же значения всех ДП находятся в интервале допустимых значений, то диагностируется работоспособное состояние ПТО.

3. Нечеткие правила могут быть следующими:

П1: если y_1 есть «удовлетворительно» И y_2 есть «удовлетворительно» И y_3 есть

«удовлетворительно» И ...И y_n есть «удовлетворительно», то Z есть «работоспособен»;
 П2: если y_1 есть «неудовлетворительно» И y_2 есть «удовлетворительно» И y_3 есть «удовлетворительно» И ...И y_n есть «удовлетворительно», то Z есть «неработоспособен»;
 П3: если y_1 есть «удовлетворительно» И y_2 есть «неудовлетворительно» И y_3 есть «удовлетворительно» И ...И y_n есть

«удовлетворительно», то Z есть «неработоспособен»;

 П2ⁿ: если y_1 есть «неудовлетворительно» И y_2 есть «неудовлетворительно» И y_3 есть «неудовлетворительно» И ...И y_n есть «неудовлетворительно», то Z есть «неработоспособен».

4. Нечеткий логический вывод выполняется по любому известному методу [18].

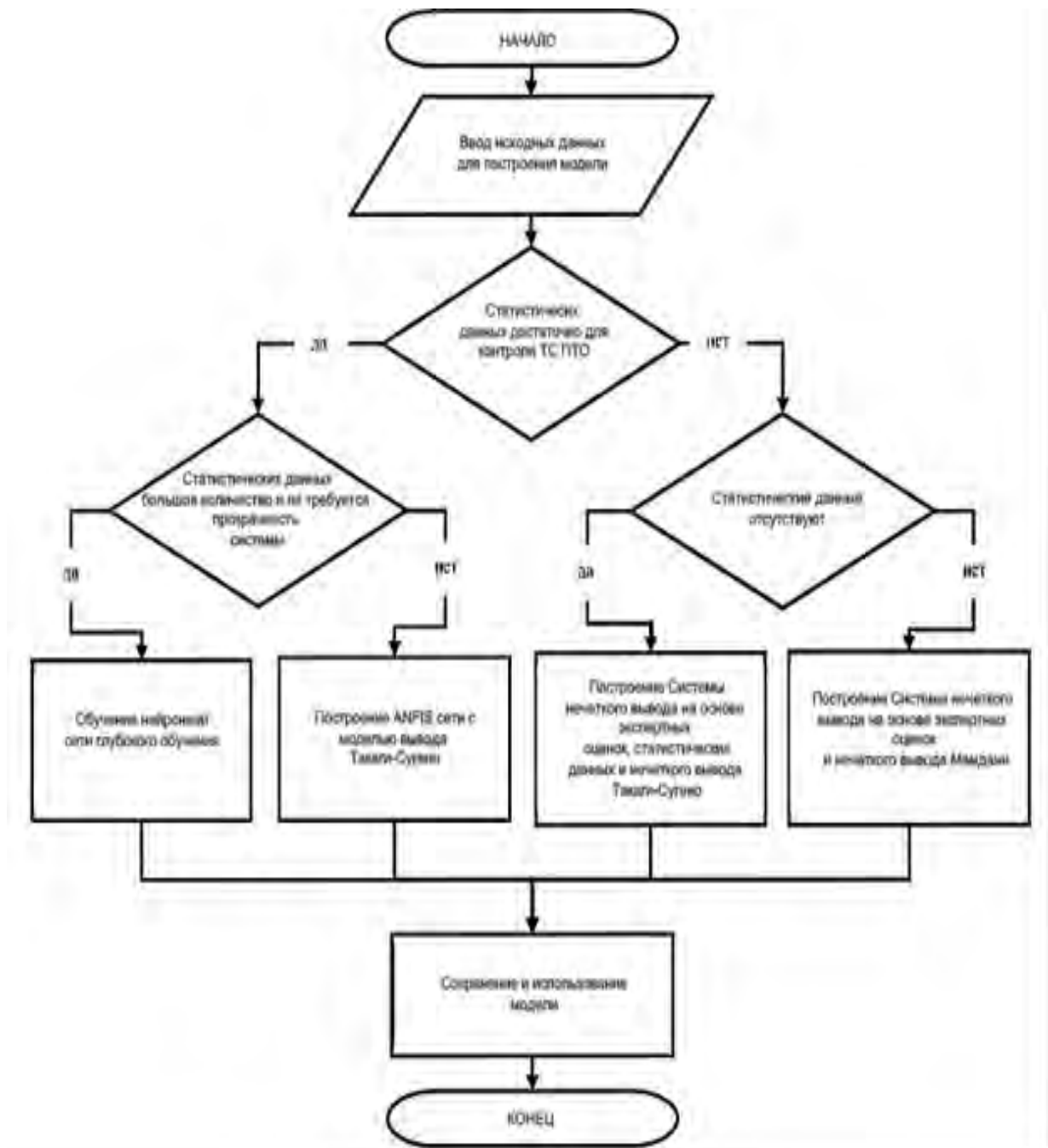


Рис. 5 – Обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода для контроля ТС ПТО

Данная задача может быть решена согласно обобщенного алгоритма выбора подходящей модели нечеткого вывода для контроля ТС ПТО, представленного на рис. 5, где представлен обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода для контроля ТС ПТО при

различных исходных данных и требованиях к системе для эффективного применения статистической информации и экспертных оценок [20]. Для реализации нечеткой системы оценки технического состояния ПТО возможно применение различных программных средств: Matlab (Simulink)

[20], Scilab, SimInTech [21], python (sckitfuzzy), Fuzzy Logic Toolbox Matlab, Cubi Calc и др. [18].

Как правило, при мониторинге ТС ПТО на предприятии ведется сбор информации о ранее происшедших ситуациях, которые можно применить для анализа ТС ПТО. Априорная информация о ТС формализуется в виде нечеткого множества с соответствующими функциями принадлежности. Реализуемые методы построения функции принадлежности основываются на знаниях экспертов. Разработка базы правил представляет собой сложную и ответственную задачу, для ее составления необходимо привлечь группу

экспертов. База правил системы нечеткого вывода необходима для того, чтобы формальным языком представить знания экспертов. Такую форму представления информации называют нечеткими продукционными правилами. Система таких нечетких продукционных правил отражает знания экспертов о параметрах ПТО, характеристиках отказов, характере функционирования ПТО в работоспособном и неработоспособном состояниях, т.е. содержит формализованные человеческие знания. На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма экспертного оценивания.



Рис. 6 - Блок-схема алгоритма экспертного оценивания.

Эффективность и точность разработанной системы оценки ТС ПТО в основном определяется качеством экспертной информации и достоверностью используемых методов ее получения. Поэтому необходимо применение различного инструментария для получения экспертных оценок.

Заключение

Для оценки ТС ПТО предложено использование методов нечеткой логики. Исследование технологий оценки ТС ПТО проведено посредством:

- рассмотрен вариант нечеткого вывода по Мамдани для контроля скорости конвейерной ленты;
- разработан алгоритм применения аппарата нечетких множеств как обобщенной модели контроля ТС ПТО;
- приведен обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода для контроля ТС ПТО;
- приведена блок-схема алгоритма экспертного оценивания;
- для реализации нечеткой системы оценки технического состояния ПТО возможно применение различных программных средств, указанных выше.

Литература

1. Kumar A., Saini V. Fuzzy availability analysis of a marine power plant - Materials Today: Proceedings, Elsevier, 2018
2. Ombirdahiya M.S., Kumar A. The mathematical modelling and performance evaluation of paint manufacturing system using fuzzy reliability approach. International Journal of Mechanical and) Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Vol. 9, 2019
3. Kumar A., Saini M. Mathematical modeling of sugar plant: a fuzzy approach. Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering. Springer Singapore, Vol. 7, 2018. pp. 11-12
4. Chachra A., Kumar A., Ram M., Triantafyllou I.S. Statistical Fuzzy Reliability Assessment of a Blended System. DOI: 10.3390/axioms12050419
5. Kabir S., Papadopoulos Y. A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. International Journal of Approximate Reasoning, Engineering, 1 September 2018
6. Chachra A., Kumar A., Ram M., Triantafyllou I.S. Statistical Fuzzy Reliability Assessment of a Blended System. DOI: 10.3390/axioms12050419
7. Chachra A., Kumar A., Ram M. Intuitionistic fuzzy approach to reliability assessment of multi-state systems. Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM), 2023, vol. 212, issue C, pp. 489-503
8. Li B., Zhu M., Xu K. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures. Reliability Engineering & System Safety, 67(3): 2000, pp.311-315
9. Hung N.T., Xuan L.H. A practical method for calculating reliability with a mixture of random and fuzzy variables. Structural Integrity and Life, 2019, vol.19, no. 3, pp.175-183

10. Орлов А.И. Искусственный интеллект: нечисловая статистика: учебник. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 446 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/117028.html>
11. Гадолина И.В. Применение теории нечетких данных в задачах оценки долговечности // Надежность. 2022. №3. С. 3-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-3-10>
12. Осокин В.Л., Папков Б.В. Оценка надёжности объектов электроэнергетики на основе теории нечётких множеств. Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. Секция 3. Эффективность систем электроэнергетики и экономия энергоресурсов, 2017. - с.154-159
13. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
14. Zadeh L.A. Fuzzy sets-NY, Information and control, 1965, no.8, pp.338-353
15. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений. Монография. М.: МГУ. 2003. –80 с.
16. Гришин А.П., Гришин А.А. Применение аппарата нечеткой логики для автоматизации технических средств сельскохозяйственного назначения. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rusnauka.com/13_EISN_2014/Tecnic/12_167143.doc.htm (Дата обращения (10.04.2024))
17. Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов. Монография. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 175 с.
18. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств. Учебное пособие. Владимирский гос. ун-т.- Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2010. – 96 с.
19. Кувайскова Ю.Е. Использование нечеткой логики для диагностики технического состояния объекта. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.20, № 4(3), 2018
20. Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Фам Ван Ты, Нилов М.Ю., Агафонов А.Н. Технология оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции с использованием нечеткой логики. Russian Technological Journal. 2020, 8(6):167-183. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>
21. Карташов Б.А., Козлов О.С., Шабаетов Е.А., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М.: ДМК Пресс; 2017. - 424 с. ISBN: 978-5-97060-482-3

References

1. Kumar A., Saini V. Fuzzy availability analysis of a marine power plant - Materials Today: Proceedings, Elsevier, 2018
2. Ombirdahiya M.S., Kumar A. The mathematical modelling and performance evaluation of paint manufacturing system using fuzzy reliability approach. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Vol. 9, 2019
3. Kumar A., Saini M. Mathematical modeling of sugar plant: a fuzzy approach. Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering. Springer Singapore, Vol. 7, 2018. pp. 11-12
4. Chachra A., Kumar A., Ram M., Triantafyllou I.S. Statistical Fuzzy Reliability Assessment of a Blended System. DOI: 10.3390/axioms12050419
5. Kabir S., Papadopoulos Y. A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. International Journal of Approximate Reasoning, Engineering, 1 September 2018
6. Chachra A., Kumar A., Ram M., Triantafyllou I.S. Statistical Fuzzy Reliability Assessment of a Blended System. DOI: 10.3390/axioms12050419
7. Chachra A., Kumar A., Ram M. Intuitionistic fuzzy approach to reliability assessment of multi-state systems. Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM), 2023, vol. 212, issue C, pp. 489-503
8. Li B., Zhu M., Xu K. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures. Reliability Engineering & System Safety, 67(3): 2000, pp.311-315
9. Hung N.T., Xuan L.H. A practical method for calculating reliability with a mixture of random and fuzzy variables. Structural Integrity and Life, 2019, vol.19, no. 3, pp.175-183
10. Orlov A.I. Artificial intelligence: non-numerical statistics: textbook. M.: AI Pi Ar Media, 2022. 446 p. URL: <https://www.iprbookshop.ru/117028.html>
11. Gadolina I.V. Application of the theory of fuzzy data in problems of durability assessment // Reliability. 2022. No. 3. pp. 3-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-3-10>
12. Osokin V.L., Papkov B.V. Assessment of reliability of electric power facilities based on the theory of fuzzy sets. Actual problems of the electric power industry: a collection of scientific and technical articles. Section 3. Efficiency of electric power systems and energy savings, 2017. - pp.154-159
13. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions / L. Zadeh. – М.: Mir, 1976. – 165 p.
14. Zadeh L.A. Fuzzy sets-NY, Information and control, 1965, no.8, pp.338-353
15. Ryzhov A.P. Elements of the theory of fuzzy sets and its applications. Monograph. Moscow: Moscow State University. 2003. -80 p.
16. Grishin A.P., Grishin A.A. Application of fuzzy logic apparatus for automation of agricultural equipment. [electronic resource]. URL: https://www.rusnauka.com/13_EISN_2014/Tecnic/12_167143.doc.htm (Date of application (04/10/2024))
17. Serebryakov A.V., Steklov A.S., Titov V.G. Monitoring and forecasting of the technical condition of autonomous electrical complexes. Monograph. Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev University. – Nizhny Novgorod, 2018. – 175 p.
18. Chernov V.G. Fundamentals of the theory of fuzzy sets. A study guide. Vladimir State University.- Vladimir: Publishing House of the Vladimir State University, 2010. – 96 p.

19. Kuvaiskova Yu.E. Using fuzzy logic to diagnose the technical condition of an object. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, vol. 20, No. 4(3), 2018
20. Chesalin A.N., Grodzensky S.Ya., Pham Van You, Nilov M.Yu., Agafonov A.N. Technology of risk assessment at the stages of the product life cycle using fuzzy logic. Russian Technological Journal. 2020, 8(6):167-183. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>
21. Kartashov B.A., Kozlov O.S., Shabaev E.A., Shchekaturov A.M. Environment of dynamic modeling of SimInTech technical systems. Moscow: DMK Press; 2017. - 424 p. ISBN: 978-5-97060-482-3

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аблязов Эмиль Кемалович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93. e-mail: amigab@mail.ru

Emil K. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: amigab@mail.ru

Аблязов Кемал Абдуллаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93. e-mail: kiril123@bk.ru

Kemal A. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: kiril123@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 14.05.2024.

Научная статья

УДК 656.6.087

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.028>

Метод экспоненциального программирования в задачах управления организационными системами поиска и спасания на водном транспорте

Куватов В.И.¹ kyb.valery@yandex.ru, Заводсков Г.Н.¹ ncuks73@mail.ru,

Балобанов А.А.¹ andrey.balobanov.92@mail.ru, Колеров Д.А.¹ dima11rus@inbox.ru

¹Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

Аннотация. Обеспечение безопасности, в том числе на водном транспорте, является одной из приоритетных задач государства, которая направлена на снижение вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций. Активное развитие научно – технологического прогресса влечёт за собой увеличение количества и тяжести чрезвычайных ситуаций, ликвидация последствий которых осуществляется силами и средствами Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Своевременное реагирование сил и средств и правильность принимаемых решений позволяет минимизировать социальные и материальные ресурсы на проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ. Оптимизация процесса управления в подобных системах возможна с помощью соответствующих математических методов и моделей. В статье рассмотрена возможность применения метода экспоненциального программирования для решения задач оптимального распределения неоднородных ресурсов между частными задачами организационной системы для повышения эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации на объектах водного транспорта. Представлен пример решения задачи экспоненциального программирования симплекс-методом дополненным правилом ограниченного ввода в базис. Применение разработанного метода позволит принимать оптимальные управленческие решения и снизить величину материального и социального ущерба с целью минимизации последствий чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: метод, экспоненциальное программирование, управление, организационные системы, математические методы.

Для цитирования: Куватов В.И., Заводсков Г.Н., Балобанов А.А., Колеров Д.А. Метод экспоненциального программирования в задачах управления организационными системами поиска и спасания на водном транспорте. 2024. № 2 часть 1, С. 252—258. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.028

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.028>

Exponential programming method in the tasks of managing organizational search and rescue systems on water transport

Valery I. Kuvatov¹ kyb.valery@yandex.ru, Gennady N Zavodskov¹ ncuks73@mail.ru,

Andrey A. Balobanov¹ andrey.balobanov.92@mail.ru, Dmitriy A. Kolerov¹ dima11rus@inbox.ru

¹St-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia

Abstract. Ensuring safety, including on water transport, is one of the priorities of the state, which is aimed at reducing the likelihood of emergency situations. The active development of scientific and technological progress entails an increase in the number and severity of emergency situations, the elimination of the consequences of which is carried out by the forces and means of the Unified State Emergency Prevention and Response System. The timely response of forces and means and the correctness of decisions made allows minimizing social and material resources for emergency rescue and other urgent work. Optimization of the management process in such systems is possible with the help of appropriate mathematical methods and models. The article considers the possibility of using the exponential programming method to solve problems of optimal distribution of heterogeneous resources between particular tasks of the organizational system to improve the effectiveness of emergency response at water transport facilities. An example of solving the exponential programming problem by the simplex method supplemented by the rule of limited input into the basis is presented. The application of the developed method will make it possible to make optimal management decisions and reduce the amount of material and social damage in order to minimize the consequences of emergency situations.

Keywords: method, exponential programming, control, organizational systems, mathematical methods.

For citation: Valery I. Kuvatov, Gennady N Zavodskov, Andrey A. Balobanov, Dmitriy A. Kolerov Exponential programming method in the tasks of managing organizational search and rescue systems on water transport. 2024. № 2 part 1, P. 252—258. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.028

Введение

Активное развитие научно – технологического прогресса влечёт за собой увеличение количества и тяжести чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1]. Задачи по предупреждению и ликвидации ЧС возложены на

министерства и ведомства, входящие в состав Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) [2], которая в свою очередь является сложной организационной системой. Функция управления компонентами РСЧС возложена на МЧС России [3].

Статистический анализ показывает высокий уровень аварийности на объектах водного транспорта, что влечёт за собой серьезные материальные затраты на организацию поисковых и спасательных мероприятий, особенно в труднодоступных и отдаленных районах [4].

Организация и координация деятельности поисковых и аварийно-спасательных служб при

поиске и спасении людей и судов, терпящих бедствие на море возложена на Минтранс России [5]. Основным элементом в схеме управления при координации поиска и спасения является Морской спасательно-координационный центр (МСКЦ) [6]. На рис. 1 представлена схема управления при координации поиска и спасения в поисково-спасательном районе МСКЦ Мурманск.

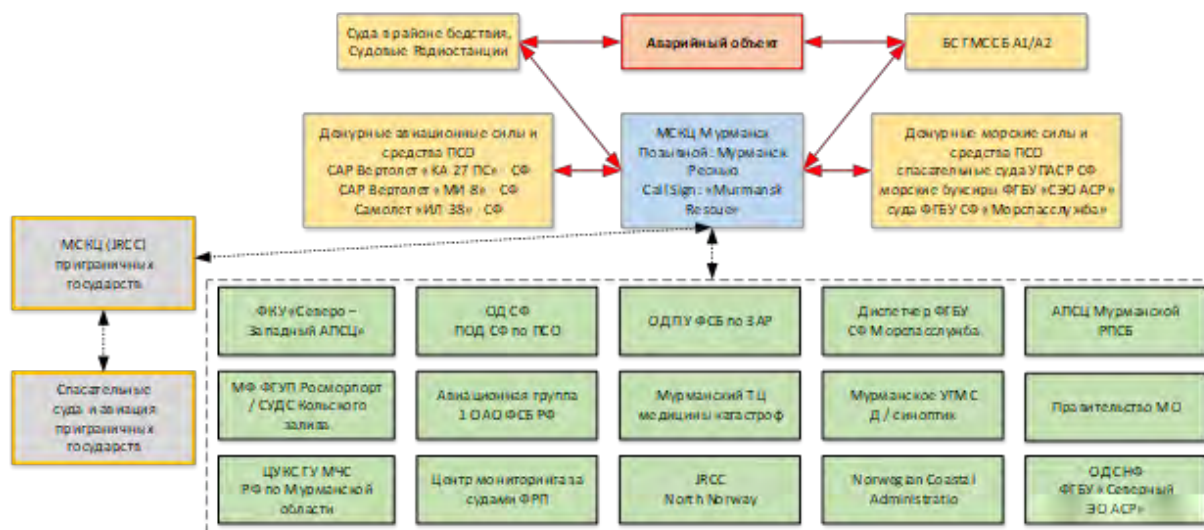


Рис. 1. Схема управления при координации поиска и спасения в поисково-спасательном районе МСКЦ Мурманск

От оптимальности принятия управленческих решений напрямую зависит величина материального и социального ущерба от ЧС [5]. Для его нахождения необходимо решить ряд частных задач. В случае, если задача хорошо структурирована, то применяются методы оптимизации, если слабо структурирована, то методы системного анализа [6, 7]. Для оптимизационных задач, у которых целевая функция является экспоненциальной, а ограничения носят линейный характер целесообразно применять разработанный в данной статье метод экспоненциального программирования.

Постановка задачи

При угрозе и возникновении ЧС лицу, принимающему решение (ЛПР), необходимо решить n частных задач. В распоряжении ЛПР имеется m типов разнородных ресурсов (суда, авиация, личный состав и т.д.), а их количество типа i , равно N_i [8]. Необходимо разделить эти ресурсы между задачами (поиск, спасение, проведение других видов работ) так, чтобы эффективность их использования при ликвидации ЧС была максимальной.

Многие задачи оптимального распределения неоднородных ресурсов между частными задачами организационной системы могут быть представлены в виде математической модели [9]:

$$\min Z(X) = \sum_{j=1}^n W_j * e^{-\sum_{i=1}^m a_{ij} * x_{ij}} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = N_i, x_{ij} \geq 0, x_{ij} - \text{целые}, \quad (2)$$

где: W_j – весовые коэффициенты, характеризующие относительную важность j -й частной задачи; a_{ij} – коэффициенты, характеризующие эффективность использования единицы ресурсов типа i для решения частной задачи j ; N_i – количество ресурсов типа i , выделенных на

решение j -й частной задачи, являются целыми числами.

Функция $Z(X)$ является выпуклой, так как для любых двух точек X^1 и X^2 имеет место неравенство

$$\lambda * Z(X^1) + (1 - \lambda) * Z(X^2) \geq Z(\lambda * X^1 + (1 - \lambda) * X^2) \quad (3)$$

Воспользуемся геометрическим неравенством:

$$\lambda * u_1 + (1 - \lambda) * u_2 \geq u_1^\lambda * u_2^{1-\lambda},$$

выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \lambda * Z(X^1) + (1 - \lambda) * Z(X^2) &= \lambda * Z(X^1) + (1 - \lambda) * Z(X^2) = \sum_{j=1}^n W_j * (\lambda * \exp(-\sum_{i=1}^m a_{ij} * x_{ij}^1) + (1 - \lambda) * \exp(-\sum_{i=1}^m a_{ij} * x_{ij}^2)) \\ &\geq \sum_{j=1}^n W_j * (\exp(-(\sum_{i=1}^m a_{ij} * x_{ij}^1 * \lambda + \sum_{i=1}^m a_{ij} * x_{ij}^2 * (1 - \lambda)))) = \sum_{j=1}^n W_j * \exp(-\sum_{i=1}^m a_{ij} * (\lambda * x_{ij}^1 + (1 - \lambda) * x_{ij}^2)) = Z(\lambda * X^1 + (1 - \lambda) * X^2). \end{aligned}$$

Выписав крайние части, получим неравенство (3). Поскольку, к тому же, ограничения (2) являются линейными функциями, то задача (1), (2) является задачей выпуклого программирования. Для решения задач выпуклого программирования с линейными ограничениями можно использовать метод линейных комбинаций или метод штрафных функций. Однако эти методы не дают целочисленного решения задачи, что не позволяет провести анализ полученного решения на чувствительность [10]. Этих недостатков в значительной степени лишен, излагаемый ниже, метод.

В соответствии с принятой в математическом программировании традицией, метод по виду целевой функции назовем методом экспоненциального программирования. Перепишем условие неотрицательности переменных x_{ij} в виде

$$-x_{ij} + \rho_{ij}^2 = 0 \quad (4)$$

Составим функцию Лагранжа:

$$L = \sum_{j=1}^n W_j * e^{-\sum_{i=1}^n a_{ij} * x_{ij}} - \sum_{i=1}^m \gamma_i * (\sum_{j=1}^n x_{ij} - N_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_{ij} * (\rho_{ij}^2 - x_{ij}).$$

Решение задачи (1), (2) эквивалентно поиску минимума функции Лагранжа. Отметим, что функция Лагранжа в данном случае является выпуклой, поэтому для определения минимума необходимо и достаточно все ее первые частные производные приравнять к нулю:

$$\frac{dL}{dx_{ij}} = -W_j * a_{ij} * e^{-\sum_{i=1}^n a_{ij} * x_{ij}} - \gamma_i + \eta_{ij} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dL}{d\gamma_i} = \sum_{j=1}^n x_{ij} - N_i = 0 \quad (6)$$

$$\frac{dL}{d\eta_{ij}} = \rho_{ij}^2 - x_{ij} = 0,$$

$$\frac{dL}{d\rho_{ij}} = -2 * \rho_{ij} * x_{ij} = 0.$$

Упростим полученную систему. Для этого объединим два последних равенства. Получим, $x_{ij} * \eta_{ij} = 0, x_{ij} \geq 0$. Отметим, что в соответствии с условиями Куна-Таккера [11] $\eta_{ij} \leq 0$. Избавимся от переменных γ_i , переписав систему уравнений (5) следующим образом:

$$\gamma_i = \eta_{ir_i} - W_{r_i} * a_{ir_i} * \exp(-\sum_{k=1}^m a_{kr_i} * x_{kr_i}) = \eta_{ij} - W_j * a_{ij} * \exp(-\sum_{k=1}^m a_{kj} * x_{kj}), \quad (7)$$

где $j \neq r_i$. Индекс r_i находится из условия $W_{r_i} * a_{ir_i}$. Запишем это условие в виде $r_i = \operatorname{argmax}[W_j * a_{ij}]$. Ответ на вопрос о том, почему индекс r_i выбран указанным способом, будет дан ниже. Заменим переменную η_{ij} переменной y_{ij} , где

$$\eta_{ij} - W_j * a_{ij} * \exp\left(\sum_{k=1}^m a_{kj} * x_{kj}\right) = -W_j * a_{ij} * \exp\left(y_{ij} - \sum_{k=1}^m a_{kj} * x_{kj}\right)$$

Анализ последнего равенства показывает: если $\eta_{ij} = 0$ то и $y_{ij} = 0$, если $\eta_{ij} < 0$, то $y_{ij} > 0$. Аналогично, если $y_{ij} = 0$, то и $\eta_{ij} = 0$, если $y_{ij} > 0$, то $\eta_{ij} < 0$. Но это означает, что система уравнений: $x_{ij} * \eta_{ij} = 0, x_{ij} \geq 0, \eta_{ij} \leq 0$, эквивалентна системе уравнений

$$x_{ij} * y_{ij} = 0, x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0 \quad (8)$$

Кроме того, уравнения (7) оказываются эквивалентными уравнениям

$$-W_{r_i} * a_{ir_i} * \exp(y_{ir_i} - \sum_{k=1}^m a_{kr_i} * x_{kr_i}) = -W_j * a_{ij} * \exp(y_{ij} - \sum_{k=1}^m a_{kj} * x_{kj}).$$

Прологарифмировав обе части последнего уравнения, и выполнив очевидные преобразования, получим

$$y_{ij} - y_{ir_i} + \sum_{k=1}^m (a_{ir_i} * x_{ir_i} - a_{kj} * x_{kj}) = \ln\left(\frac{W_{r_i} * a_{ir_i}}{W_j * a_{ij}}\right) \quad (9)$$

Отметим, что поскольку $W_{r_i} * a_{ir_i} > W_j * a_{ij}$, то правая часть уравнений (9) положительна. Кроме того, отметим, что любая переменная y_{ij} , $j \neq r_i$, в уравнениях (9) встречается ровно один раз.

Система уравнений (6), (8), (9), полученная в результате преобразований, эквивалентна исходной задаче (1), (2). Эта система содержит $2 * n * m$ уравнений с неизвестными, на каждую из которых наложено дополнительное условие неотрицательности. В силу выпуклости функции Лагранжа задачи (1), (2) система уравнений (6), (8), (9), имеет единственное допустимое решение. Это решение может быть получено с помощью двухэтапного метода искусственных переменных, [12].

Сформулируем задачу:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m R_i,$$

$$y_{ij} - y_{ir_i} + \sum_{k=1}^m (a_{ir_i} * x_{ir_i} - a_{kj} * x_{kj}) = \ln\left(\frac{W_{r_i} * a_{ir_i}}{W_j * a_{ij}}\right),$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} + R_i = N_i,$$

$$x_{ij} * y_{ij} = 0,$$

$$x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0, R_i \geq 0,$$

$$r_i = \operatorname{argmax}[W_j * a_{ij}].$$

$$i, k = 1, 2, \dots, m, j, r_i = 1, 2, \dots, n.$$

Эта задача является обычной задачей первого этапа двухэтапного метода искусственных переменных с одним отличием. Это отличие заключается в том, что она содержит $n * m$ ограничений $x_{ij} * y_{ij} = 0$. При решении данной задачи симплекс-методом эти ограничения легко могут быть учтены. Каждый раз при вводе в базис очередной переменной x_{ij} (y_{ij}) необходимо проверять, является ли базисной переменная y_{ij} (x_{ij}). Если переменная y_{ij} является базисной, то переменную x_{ij} в базис вводить нельзя. И наоборот, если x_{ij} переменная является базисной, то переменную y_{ij} в базис вводить нельзя. В связи с этим назовем ограничения $x_{ij} * y_{ij} = 0$ условиями ограниченного ввода в базис.

Начальными базисными переменными в данной задаче будут переменные $y_{ij}, j \neq r_i$, для каждого i и искусственные переменные R_i . Именно для того, чтобы в качестве начальных базисных переменных можно было взять переменные y_{ij} и, тем самым сократить количество искусственных переменных, а, следовательно, уменьшить вычислительную сложность решения задачи, индекс r_i находится из условия $r_i = \operatorname{argmax}[W_j * a_{ij}]$.

В соответствии с алгоритмом симплекс-метода целевая функция перед началом вычислений должна быть приведена к виду

$$\min Z = \sum_{i=1}^m R_i = \sum_{i=1}^m (N_i - \sum_{j=1}^n x_{ij}).$$

Результаты исследования и их обсуждение

В результате решения данной задачи все искусственные переменные и целевая функция окажутся равными нулю (с учетом погрешности вычислений), а переменные x_{ij} , y_{ij} получат неотрицательные значения. При этом переменные x_{ij} будут указывать оптимальное решение исходной задачи.

Таким образом, метод экспоненциального программирования позволяет задачу выпуклого программирования вида:

$$\min Z(x) = \sum_{j=1}^n W_j * e^{-\sum_{i=1}^n a_{ij} * x_{ij}},$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = N_i, x_{ij} \geq 0, x_{ij} - \text{целые},$$

свести к задаче линейного программирования, дополненной условием ограниченного ввода в базис:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m (N_i - \sum_{j=1}^n x_{ij})$$

$$y_{ij} - y_{ir_i} + \sum_{k=1}^m (a_{ir_i} * x_{ir_i} - a_{kj} * x_{kj}) = \ln\left(\frac{W_{r_i} * a_{ir_i}}{W_j * a_{ij}}\right),$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} + R_i = N_i,$$

$$x_{ij} * y_{ij} = 0,$$

$$x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0, R_i \geq 0,$$

$$r_i = \operatorname{argmax}[W_j * a_{ij}], i, k = 1, 2, \dots, m, j, r_i = 1, 2, \dots, n.$$

Решение данной задачи не является

целочисленным. Для получения целочисленного решения можно применить метод «ветвей и границ» [12].

Решение задачи.

В поисково-спасательном районе МСКЦ Мурманска терпят бедствие два судна, находящихся в разных частях акватории, точное местоположение которых неизвестно. В распоряжении ЛПР имеется 20 единиц ресурсов разного типа ($N_1 = 10$ – количество судов и $N_2 = 10$ – количество авиационных средств). Предполагается, что каждое средство может участвовать либо в поиске, либо в спасении. Необходимо распределить ресурсы между частными задачами таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность поисково-спасательных работ.

$$\min Z(X) = e^{-(0.1 \cdot x_{11} + 0.4 \cdot x_{21})} + e^{-(0.3 \cdot x_{12} + 0.4 \cdot x_{22})}$$

$$x_{11} + x_{12} = 10, x_{21} + x_{22} = 10,$$

$$x_{ij} \geq 0, x_{ij} - \text{целые.}$$

Здесь первое слагаемое целевой функции моделирует поиск, второе слагаемое – спасение.

Перейдем от данной задачи к задаче линейного

программирования, дополненной условиями ограниченного ввода в базис:

$$\min Z = 20 - x_{11} - x_{12} - x_{21} - x_{22},$$

$$y_{11} - y_{12} - 0.1 \cdot x_{11} + 0.3 \cdot x_{12} - 0.4 \cdot x_{21} + 0.2 \cdot x_{22} = 1.099,$$

$$-y_{21} + y_{22} + 0.1 \cdot x_{11} - 0.3 \cdot x_{12} + 0.4 \cdot x_{21} - 0.2 \cdot x_{22} = 0.693$$

$$x_{11} + x_{12} + R_1 = 10, x_{12} + x_{22} + R_2 = 10,$$

$$x_{ij} \cdot y_{ij} = 0, x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0, R_i \geq 0.$$

Как следует из таблицы, решена за четыре итерации. В результате решения получено частично целочисленное решение: $x_{11}=0$; $x_{12}=10$; $x_{21}=9.492$; $x_{22}=0.508$; $y_{11}=1.793$; $y_{12}=y_{21}=y_{22}=0$. Возвращаясь к исходной задаче получим, что оптимальным будет такое распределение ресурсов, при котором 9.492 ресурсов второго типа назначить на решение первой частной задачи, а 10 единиц ресурсов первого типа и 0.508 единиц ресурсов второго типа назначить на решение второй частной задачи.

Таблица 1

Решение задачи экспоненциального программирования симплекс-методом, дополненным правилом ограниченного ввода в базис

Баз. пер. пере мен.	Переменные										Решение
	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	R_1	R_2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Z	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	20
Y_{11}	1	-1	0	0	-0.1	0.3	-0.4	0.2	0	0	1.099
Y_{22}	0	0	-1	1	0.1	-0.3	0.4	-0.2	0	0	0.693
R_1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	10
R_2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10
Z	-3.33	3.33	0	0	1.33	0	2.33	0.33	0	0	16.4
X_{12}	3.33	-3.33	0	0	0.33	1	-1.33	0.67	0	0	3.66
Y_{22}	0.99	-0.99	-1	1	0.01	0	0	0	0	0	1.79
R_1	-3.33	3.33	0	0	1.33	0	1.33	-0.67	1	0	6.34
R_2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	10
Z	2.5	-2.5	0	0	-1	0	0	1.5	-1.75	0	5.25
X_{12}	0.001	-0.001	0	0	1	1	0	0.001	1	0	10
Y_{22}	0.999	-0.999	-1	1	0.001	0	0	0	0.25	0	1.79
X_{21}	-2.5	2.5	0	0	-1	0	0	-0.5	-0.75	1	4.75
R_2	2.5	-2.5	0	0	-1	0	0	1.5	-0.75	1	5.25
Z	0	0	2.5	-2.5	-1.0	0	0	1.5	-1.75	0	0.76
X_{12}	0	0	0.001	-0.001	1	1	0	0.001	1	0	9.998
Y_{11}	1	-1	-1.001	1.001	-0.001	0	0	0	0	0	1.793
X_{21}	0	0	-2.5	2.5	0.003	0	1	-0.5	0.75	0	9.237
R_2	0	0	2.5	-2.5	-	0	0	1.5	-0.75	1	0.763
Z	0	0	0	0	-1.006	0	0	0	-1	-1	0.001
X_{12}	0	0	0	0	1	1	0	0	1.001	-0.001	10
Y_{11}	1	-1	-1	1	0.001	0	0	0	0	0	1.793
X_{21}	0	0	-1.67	1.67	0.002	0	1	-0.5	0.5	0.334	9.492
X_{22}	0	0	1.67	-1.67	0.002	0	0	1	-0.5	0.67	0.508

В нашем случае оба типа ресурсов являются целочисленными. Тогда решение, полученное в таблице, необходимо привести к целочисленному виду. Будем решать задачу целочисленного программирования методом «ветвей и границ».

Поделим задачу (10), на две задачи, введя в первую из новых задач ограничение $x_{22} = 0$, а во вторую – ограничение $x_{22} \geq 1$. Для первой задачи получим целочисленное решение $x_{11} = 0, x_{12} = 10, x_{21} = 10, x_{22} = 0$. Для второй задачи также получим целочисленное решение $x_{11} = 0, x_{12} =$

$10, x_{21} = 9, x_{22} = 1$. Подставив в целевую функцию исходной задачи оба решения, получим: $Z(0,10,10,0) = 0.06812, Z(0,10,9,1) = 0.06811$. Таким образом, оптимальным является второе решение, при котором 10 единиц ресурса первого типа и 1 единица второго типа назначается на решение второй частной задачи, а 9 единиц ресурса второго типа – на решение первой частной задачи.

Заключение

Метод экспоненциального программирования, разработанный в данной статье, позволяет найти оптимальное решение для любой задачи исследования операций у которой целевая функция Z является выпуклой и может быть представлена в виде суммы экспонент, ограничения – линейными, а все или часть управляемых переменных – целочисленными. Задачами, с такими свойствами, являются многие задачи поиска (спасения) людей и судов, терпящих бедствие на море. Для решения таких задач можно применять метод линейных комбинаций, метод штрафных функций и пр. Однако при этом, возникают проблемы с получением целочисленного решения и с анализом чувствительности полученного решения.

В отличие от других методов решения аналогичных задач, метод экспоненциального программирования позволяет свести задачу с

вышеуказанными свойствами к задаче линейного программирования, дополненной условием ограниченного ввода в базис и решить ее как задачу первого этапа двухэтапного метода искусственных переменных. При этом решение может оказаться нецелочисленным. Однако получить из этого решения целочисленное достаточно просто методом ветвей и границ, что и сделано в статье. Анализ чувствительности полученного решения в статье не рассмотрен, так как технология такого анализа для задач линейного программирования, в том числе и с учетом ограниченного ввода в базис, хорошо известна.

Применение математических методов при решении задач управления организационными системами поиска и спасания на объектах водного транспорта позволяет повысить эффективность реагирования на ЧС путем оптимизации распределения неоднородных ресурсов между частными задачами.

Литература

1. Оценка и управление деятельностью пожарно-спасательных подразделений ГПС МЧС России / Н. В. Мартинович, А. С. Смирнов, А. А. Мельник, А. В. Калач // Вестник Воронежского института ФЦИН России. – 2019. – № 4. – С. 109-115. – EDN HTJYFL.
2. Куватов В. И., Горбунов А. А., Колеров Д. А. Метод интеллектуальной поддержки управленческих решений с помощью ассоциативных связей при прогнозировании чрезвычайных ситуаций // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". 2022. № 2. с. 116-124.
3. Закинчак, А. И. Совершенствование процесса организации мероприятий по доведению информации и оповещению должностных лиц при ликвидации ЧС природного и техногенного характера / А. И. Закинчак, А. А. Елизарова, Р. В. Блинов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 4(49). – С. 28-36. – EDN FJTLEC.
4. Щетка В.Ф., Заводсков Г.Н., Онов В.А. Информационная система поддержки принятия решений по обеспечению безопасности на водном транспорте // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. №1. – С. 93-99.
5. К вопросу разработки модели оценки устойчивости организационных структур / А. В. Калач, Т. Е. Смоленцева, А. С. Смирнов, И. Г. Малыгин // Вестник Воронежского института ФЦИН России. – 2022. – № 4. – С. 78-84. – EDN IUFBMR.
6. Куватов В.И., Балобанов А.А., Колеров Д.А. Исследование операций: учебное пособие. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2024. 236 с.
7. Дронь, Е. А. Модель единого информационного пространства системы управления человеческими ресурсами в организации / Е. А. Дронь, Т. В. Павлович, А. В. Калач // Вестник Воронежского института ФЦИН России. – 2023. – № 3. – С. 53-59. – EDN SUFIJO.
8. Marinov, M. The human factor-how to solve the problem? / M. Marinov, D. Skorokhodov, S. Turusov // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – No. 3-3(37). – P. 89-96. – EDN YPLATC.
9. Матвеев, А. В. Методы моделирования и прогнозирования / А. В. Матвеев. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2022. – 230 с. – ISBN 978-5-907116-73-3. – EDN IMLKWS.
10. Бутырский, Е. Ю. Математическое моделирование систем и процессов / Е. Ю. Бутырский, А. В. Матвеев. – Санкт-Петербург: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2022. – 733 с. – ISBN 978-5-4268-0064-9. – DOI 10.37468/book_011222. – EDN CCRIRT.
11. Скороходов, Д. А. Методологические принципы управления безопасностью региональных транспортных систем: Научное издание / Д. А. Скороходов, А. Л. Стариченков, И. В. Степанов; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. – 271 с. – ISBN 978-5-91155-058-5. – EDN ZAEPSX.
12. L. V. Zubova, E. V. Korovin, A. S. Smirnov [et al.] Development of Problem-Oriented Management and Decision-Making System and Optimization of Economic and Social Systems. Webology. – 2021. – Vol. 18, No. Special Issue. – P. 436-451. – DOI 10.14704/WEB/V18SI05/WEB18239. – EDN DLLTRA.
13. Модель и методика оценки степени сложности системы управления пожарно-спасательными подразделениями на пожаре / Е. В. Степанов, М. Х. Х. Чан, Б. Б. Гринченко [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 1(46). – С. 47-56. – EDN DGCRVX.

References

1. Martinovich N.V., Smirnov A.S., Melnik A.A., Kalach A.V. Ocenka i upravlenie deyatel'nost'yu pozharno-spasatel'nyh podrazdelenij GPS MCHS Rossii [Assessment and management of the activities of fire and rescue units of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. – 2019. – № 4. – S. 109-115. – EDN HTJYFL.
2. Kuvatov V.I., Gorbunov A.A., Kolerov D.A. Metod intellektual'noj podderzhki upravlencheskih reshenij s pomoshch'yu associativnyh svyazey pri prognozirovanii chrezvychajnyh situacij [Method of intellectual support of managerial decisions using associative connections in predicting emergency situations]. Nauchno-analiticheskij zhurnal "Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii". 2022. № 2. s. 116-124.
3. Zakinchak A.I., Elizarova A.A., Blinov R.V. Sovershenstvovanie processa organizacii meropriyatij po dovedeniyu informacii i opoveshcheniyu dolzhnostnyh lic pri likvidacii CHS prirodnogo i tekhnogenno go haraktera [Improving the process of organizing measures to bring information and notify officials in the liquidation of natural and man-made emergencies]. Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. – 2023. – № 4(49). – S. 28-36. – EDN FJTLEC.
4. Shchetka V.F., Zavodskov G.N., Onov V.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij po obespecheniyu bezopasnosti na vodnom transporte [Information system for decision-making support for safety in water transport]. Scientific and analytical journal «Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia». 2021. issue 1. – pp. 93-99.
5. Kalach A.V., Smolentseva T.E., Smirnov A.S., Malygin I.G. K voprosu razrabotki modeli ocenki ustojchivosti organizacionnyh struktur [On the issue of developing a model for assessing the stability of organizational structures]. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. – 2022. – № 4. – S. 78-84. – EDN IUFBMR.
6. Kuvatov V.I., Balabanov A.A., Kolerov D.A. Issledovanie operacij: uchebnoe posobie [Operations research: a textbook.] SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2024. 236 s.
7. Dron, E.A., T.V. Pavlovich, Kalach A.V. Model' edinogo informacionnogo prostranstva sistemy upravleniya chelovecheskimi resursami v organizacii [Model of the unified information space of the human resource management system in the organization]. Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. - 2023. – issue 3. – pp. 53-59. – EDN SUFIJO.
8. M. Marinov, D. Skorokhodov, S. Turusov The human factor-how to solve the problem? Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2017. – No. 3-3(37). – P. 89-96. – EDN YPLATC
9. Matveev, A.V. Metody modelirovaniya i prognozirovaniya [Methods of modeling and forecasting]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij universitet Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij imeni Geroya Rossijskoj Federacii generala armii E.N. Zinicheva, 2022. – 230 s. – ISBN 978-5-907116-73-3. – EDN IMLKWS.
10. Butyrsky E. Y., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov [Mathematical modeling of systems and processes]. Sankt-Peterburg: Informacionnyj izdatel'skij uchebno-nauchnyj centr «Strategiya budushchego», 2022. – 733 s. – ISBN 978-5-4268-0064-9. – DOI 10.37468/book_011222. – EDN CCRIRT.
11. Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L., Stepanov I.V. Metodologicheskie principy upravleniya bezopasnost'yu regional'nyh transportnyh sistem: Nauchnoe izdanie [Methodological principles of safety management of regional transport systems: Scientific publication]. St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI», N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions. – St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. – 271 p. – ISBN 978-5-91155-058-5. – EDN ZAEPSX.
12. L. V. Zubova, E. V. Korovin, A. S. Smirnov [et al.] Development of Problem-Oriented Management and Decision-Making System and Optimization of Economic and Social Systems. Webology. – 2021. – Vol. 18, No. Special Issue. – P. 436-451. – DOI 10.14704/WEB/V18SI05/WEB18239. – EDN DLLTRA.
13. E. V. Stepanov, M. H. H. Chan, B. B. Grinchenko [et al.] Model' i metodika ocenki stepeni slozhnosti sistemy upravleniya pozharno-spasatel'nymi podrazdeleniyami na pozhare [The model and methodology for assessing the degree of complexity of the management system of fire and rescue units in a fire]. Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. – 2023. – № 1(46). – S. 47-56. – EDN DGCRVX.

Конфликт интересов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest

Authors' contribution: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куватов Валерий Ильич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: kyb.valery@yandex.ru

Заводсков Геннадий Николаевич, старший преподаватель кафедры системного анализа и антикризисного управления Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: ncuks73@mail.ru

Балобанов Андрей Александрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры системного анализа и антикризисного управления Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: andrey.balobanov.92@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Колеров, преподаватель кафедры системного анализа и антикризисного управления Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: dima11rus@inbox.ru

Valery I. Kuvatov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of System Analysis and Crisis Management, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky pr., 149; e-mail: kyb.valery@yandex.ru

Gennady N Zavodskov, Senior Lecturer of the Department of System Analysis and Crisis Management, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky pr., 149; e-mail: ncuks73@mail.ru

Andrey A. Balobanov, Ph.D. (Eng), Lecturer of the Department of System Analysis and Crisis Management, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky pr., 149; e-mail: andrey.balobanov.92@mail.ru

Dmitry A. Kolerov, teacher of the Department of System Analysis and Crisis Management, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky pr., 149; e-mail: dima11rus@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.04.2024.

Научная статья

УДК 504.4.062.2:627.235

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.029>

Системный анализ экологических факторов при проектировании прибрежных транспортных объектов в арктических морях

Кузнецова Е.Ю.¹ helhena@mail.ru, Даргис Е.А.¹ dargis72@mail.ru,

Скороходов Д.А.² skorohodda@mail.ru, Никитин, Н.В.³ morintex_spb@mail.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ²Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ³Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рост промышленной деятельности на акваториях российского нефтегазового арктического шельфа сопровождается созданием различных специализированных многофункциональных грузоперевалочных комплексов, основу которых на трассе Северного морского пути представляют морские порты. Развитие портовой и прибрежной инфраструктуры неразрывно связано с необходимостью обеспечения бесперебойного и безаварийного функционирования порта, а в суровых условиях российской Арктики одним из важнейших вопросов является вопрос обозначения навигационных и экологических рисков в процессе эксплуатации планируемого объекта. В работе проведен детальный анализ непосредственно устьевой акватории реки Индига, выбранной в качестве наиболее подходящего места для возведения нового транспортного объекта. Обозначено значение специфических параметров окружающей природной среды при проектировании прибрежных морских объектов в зоне арктических морей. Представлена оценка влияния прибрежных волновых потоков как наносодвижущего фактора, и основания рассматривать их динамические процессы в комплексе с морфологическими особенностями исследуемой акватории как потенциальную угрозу блокировки будущей судоходной трассы песчаными перемычками. Обоснованы предложения по установке инженерных конструкций волногасящего типа для перекрытия потока наносов и защиты причальных линий от прямого волнового воздействия.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, морская инфраструктура, экология, прибрежная зона, волновые потоки, волногасящие конструкции.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Кожухову Игорю Валентиновичу за предоставление данных.
Для цитирования: Кузнецова Е.Ю., Даргис Е.А., Скороходов Д.А., Никитин Н.В., Системный анализ экологических факторов при проектировании прибрежных транспортных объектов в арктических морях. 2024. № 2 часть 1, С. 259—269. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.029

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.029>

System analysis of environmental factors in the planning and design of coastal transportation infrastructure at Arctic seas

Elena Y. Kuznetsova¹ helhena@mail.ru, Evgeniy A. Dargis¹ dargis72@mail.ru,

Dmitriy A. Skorohodov² skorohodda@mail.ru, Nikolai V. Nikitin³ morintex_spb@mail.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, ²Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, ³St. Petersburg state marine technical University

Abstract. The growth of industrial activity in the waters of the Russian Arctic oil and gas shelf accompanied by the creation of various specialized multifunctional cargo complexes. Seaports represent the basis of cargo complexes on the route of the Northern Sea Route. The development of port and coastal infrastructure closely linked to ensuring trouble-free operation of the port. In the harsh conditions of the Russian Arctic, one of their most important issues is the designation of navigational and environmental risks of the new facility. The paper provides a detailed analysis of the mouth of the Indiga River. This water area has been chosen as the most suitable place for the construction of a new transport facility. The importance of specific environmental parameters in the design of coastal marine facilities in the Arctic seas zone indicated. The paper presents an assessment of the influence of coastal wave flows as a factor creating the shoal. The reasons are present to consider the dynamic processes and morphological features of the studied water area as a potential threat of blocking the future shipping route by sand bridges. The proposals for the installation of engineering wave-damping structures are substantiated. Their purpose is to block the flow of sediment and protect the marine berths from direct wave action.

Key words: Arctic, Northern Sea route, marine infrastructure, ecology, coastal zone, wave currents, wave damping structures

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Igor V. Kozhukhov for providing the data

For citation: Elena Y. Kuznetsova, Evgeniy A. Dargis, Dmitriy A. Skorohodov, Nikolai V. Nikitin, System analysis of environmental factors in the planning and design of coastal transportation infrastructure at Arctic seas. 2024. № 2 part 1, P. 259—269. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.029

Ведение

Рост транспортной активности на трассах Северного морского пути (СМП) требует развития портовой и прибрежной инфраструктуры, поскольку тесно связан с ростом промышленной деятельности на акваториях российского нефтегазового арктического шельфа. На сегодняшний день в разной степени это относится к основным портам СМП, в число которых вошел транспортный объект, расположенный в Чёшской губе Баренцева моря ((1)).

Транспортные коммуникации между планируемым портом Индига и Нарьян-Маром способны решить многие социально-экономические проблемы и обеспечить толчок развитию западной части Ненецкого автономного округа. Речь идёт и о позитивных для местного населения социальных сдвигах, включая демографические проблемы.

Строительство стационарного нефтяного терминала позволит ежегодно отгружать на экспорт до 30 млн. тонн нефти. Порт может стать также альтернативной возможностью для соединения СМП с транспортным коридором Восток – Запад. Кроме того, он соединит Ненецкий автономный округ, вдоль берегов которого проходит 1/8 часть СМП, с транспортной сетью России.

Бухта Усть – Индига расположена в 200-250 км от воркутинской магистрали и на близкой по размеру дистанции от существующих основных нефтепроводов. На данном участке предполагается строительство дополнительного терминала для транспортировки углеводородов. Вниз по р Индига удобно поставлять коксующийся уголь Воркутинского бассейна и разнообразные уральские грузы. Перспективной сегодня считается также возможность размещения на территории порта ремонтной базы атомного флота.

Важной составляющей проекта служит запланированное строительство к 2030 году железной дороги до Сосногорска длиной в 612 км ((2)). Новый маршрут может использоваться для вывоза калийных солей, леса, угля с Северного Урала и Сибири для дальнейшей их транспортировки по трассе СМП. Глубоководный порт в Индиге и автомобильная дорога от него позволят решить и ряд иных логистических проблем, обеспечить устойчивый вариант поставок нефти и нефтепродуктов ((3)). Речь, прежде всего, о Тимано-Печорском нефтегазовом бассейне, рядом находятся два газовых месторождения – Кумжинское и Коровинское. В рамках проекта «Индига» на базе

ресурсов Кумжинского месторождения предполагается строительство газохимического комплекса. Инфраструктура будет состоять из самого комплекса, газопровода и морского отгрузочного терминала, контейнерного терминала и терминала для генеральных грузов.

Основу для специализированных грузоперевалочных комплексов на трассе СМП представляют морские порты ((4)). А обеспечение бесперебойного и безаварийного функционирования морских перегрузочных комплексов (МПК) в первую очередь связано с решением вопросов, касающихся оптимальной эксплуатации соответствующих портов СМП.

При проектировании транспортных прибрежных и морских объектов в зоне арктических морей необходимо проведение системных исследований, в том числе параметров окружающей среды. Кроме ледового режима региона, особое внимание необходимо уделять, волновым характеристикам, типу местных грунтов и, связанному с этим, вопросу литодинамики прилегающих морских мелководий.

В качестве предмета данного исследований был выбран территориально более обширный объект – акватория Чёшской губы в целом. Именно здесь, в силу географических, экономических и организационных предпосылок, намечено создание нового производственного объекта – МПК. Конкретно сосредоточено внимание на исследовании участка водоёма «Княжья губа» (устье реки Индига). В пользу названного участка был сделан окончательный выбор места строительства нового порта, данный участок побережья признан наиболее оптимальным местом для размещения МПК.

Для проведения оценки настоящего объекта, в качестве исходного материала были использованы данные ряда публикаций, а также анализ неопубликованных работ на аналогичных высокоширотных береговых объектах [5, 6, 7], исследования проводились с учетом прогнозируемых в обозримом будущем изменений климатической ситуации, в том числе и в исследуемом арктическом регионе [8, 9].

1. Значение специфических параметров окружающей природной среды при проектировании прибрежных морских объектов в зоне арктических морей

На рисунке 1 представлен спутниковый снимок рассматриваемого объекта.

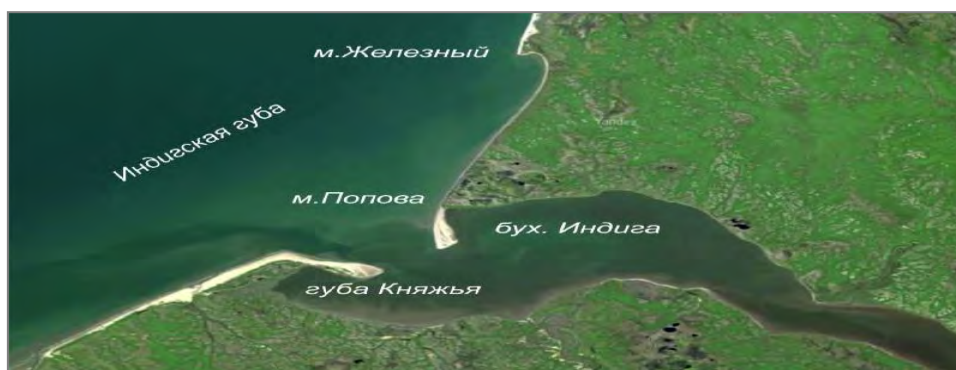


Рис. 1. Спутниковый снимок устьевой части реки бухты Индига

Среди благоприятных природных характеристик участка, в значительной степени обусловивших выбор настоящего места, характер подходов глубин в пределах всей акватории. Отметки дна вблизи берега здесь достигают 18 метров [7]. Подобное обстоятельство позволяет в перспективе принимать балкеры и танкеры дедвейтом до 800 тысяч тонн. Таким образом, при формировании местных водных путей, благополучно решается одна из главных проблем малой навигации – возможность эксплуатировать будущий участок судоходной трассы без привлечения дноуглубительной техники.

Ветер, волнение

Важной природной особенностью района является существующий ветровой режим в сочетании с характером ветровой волны. Зимой (ноябрь-апрель) в данном районе наблюдается преобладание ветров южной, а летом (июнь-август) – северной четвертей. В зимний период сезона суммарная повторяемость северных румбов в Индиге составляет 13%, а летом – 50%. Активность ветров южных румбов зимой у Индиги близка к 61%. В летнее время она снижается до 23%.

Наиболее характерными для Индиги являются ветры юго-западных направлений (в среднем зимой 8 – 10 м/с, а летом 6,5 – 7 м/с). Максимальная скорость ветра в указанном районе достигает 40 м/с. В летний период преобладают максимумы скоростей 15 – 20 м/с по всей акватории Чёшской губы. В зимний период Индиге свойственно преобладание повторяемости максимума скорости 25 – 30 м/с. К штормовым относятся скорости ветра от 15 м/с и более. Штормовая погода чаще наблюдается в осенне-зимний период, когда число дней со скоростью ветра 15 м/с и больше составляет 4 – 10 в месяц. В летний период число штормов минимально, 1 – 2 дня в месяц. За год в Индиге в режиме сильных ветров зафиксировано более 60 дней. В итоге, среднегодовая суммарная продолжительность штормов составляет в Индиге порядка 458 часов при максимальной продолжительности в 747 часов [5, 6, 7].

Таблица 1

Наибольшая продолжительность скорости ветра 15 м/с и более (ГМС Индига)

Направление	С	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Продолжит. (час)	36	42	54	78	42	48

Приливные процессы

Следующей особенностью природного характера, способной серьезно влиять на работу порта, является приливной режим в Чёшской губе. Приливы формируются под влиянием собственной приливной волны Баренцева моря. На мелководье происходит существенная трансформация приливной волны, наиболее выраженная как раз вдоль побережий названной акватории. Значительные амплитуды приливов в пределах Чёшской губы в целом связаны, с местными резонансными условиями. Так, величина сизигийной амплитуды прилива в северных частях залива может достигать величины в 3,4 м. А в направлении к южной части Губы наблюдается рост сизигийной величины до 4,2 м. В квадратуру величина прилива 1,5-2,0 раза меньше, чем в сизигию. Что касается конкретно Индиги, то наибольшие отметки высот прилива относительно

среднего уровня колеблются от 1,191 м до 1,294 м. Наименьшие отметки изменяются в пределах от – 1,206 м до –1,314 м. Получается, что в сумме наибольший размах приливных колебаний может достигать 2,61 м.

Для станции Индига, где имеются продолжительные ряды уровенных наблюдений, была дана оценка максимально возможных суммарных колебаний уровенной поверхности (приливные совместно с ветровыми сгонно-нагонными процессами). Эти колебания относительно условного нуля глубин (среднего уровня моря) составили –1,95 м до +2,04 м. Т.е. общий размах уровенных колебаний в этой точке по данным непосредственных наблюдений может достигать весьма значительных величин, близких к 4-ем метрам. Подобное обстоятельство позволяет причислить настоящий участок мелководья к зоне высокой динамической активности [7].

Течения

Сведения о течениях в пределах Индигской губы немногочисленны. Известно, что приливные течения носят полусуточный характер. Если говорить о Чёшской губе в целом, то здесь максимальные скорости приливных течений (около 2,1 м/с) наблюдались в районе м. Микулкин. А к югу и к востоку от мыса скорость течений уменьшается до 0,5-1,0 м/с. Для морских условий подобный диапазон скоростей можно считать весьма значительным [3, 6].

Ледовые условия

Что касается ледовой обстановки в будущем порту, то в обозначенном районе возможна круглогодичная навигация, благодаря тёплому течению Гольфстрим. Одна из ветвей течения достигает пределов бухты. Масса подогретой воды способствует частичному разрушению ледового покрова. Получается, что, не смотря на суровый климат, на данном участке акватории возможны проводки судов ледового класса, даже без ледокольного сопровождения. В частности, при проводке в западном направлении подобные операции могут по срокам осуществляться до восьми месяцев в году. В восточном направлении – только до пяти месяцев. Иными словами, при наличии современного ледокольного флота порт в бухте Усть-Индига может осуществлять активную деятельность практически круглый год. Данное обстоятельство позволит не только производить, но и более эффективно организовать отгрузку продуктов нефтепереработки всем потребителям, обеспечит высококачественным топливом трассу СМП. Подобное развитие арктической инфраструктуры в значительной мере позволит решить задачу развития современной транспортной схемы на государственном уровне [7, 10].

Типы берегов и осадки

Морфология берегов конкретно по Индигской бухте определяется низкими берегами с лайдами высотой до 2 – 3 м. Непосредственно в береговой зоне выражены клифы (крутые откосы), штормовые валы, песчаные и песчано-галечные пляжи и осушки. В пределах слабо изрезанной береговой линии выделяются неглубокие бухты и выдающиеся в море мысы, а также редкие лагуны.

Что касается участков мелководья в пределах настоящей акватории, то здесь преобладает однообразный плоский рельеф, местами усложненный аккумулятивными и скальными банками. Аккумулятивные валы, ориентированы, как правило, параллельно основному направлению приливо-отливных течений. В подводной части рельефа просматриваются продолжения русел рек. С приливами в Индигской губе связано и широкое распространение осушек, которые протягиваются вдоль всего побережья.

Осадки Индигской губы представлены широкой гаммой от валунных и галечно-гравийных скоплений до алевритовых и глинистых илов. Поверхность дна всей Индигской губы сложена преимущественно песчаным материалом. Подводный береговой склон не имеет четко выраженной границы и постепенно переходит в дно мелководной губы.

Таким образом, поверхность дна всей Индигской губы характеризуется, в основном, аккумулятивным рельефом, сложенными, как было отмечено, главным образом песчаным материалом.

Литодинамика открытого побережья Индигской губы

Обломочный материал дифференцируется по крупности в соответствии с распределением скоростей приливо-отливного и волнового потоков. При этом их транспортирующая способность достаточно велика, чтоб двигать обломки до 10 мм в диаметре. А в самом горле губы скорости течений оказываются подходящими даже для переноса частиц гравийной размерности. Что касается транспортировки галечных фракций, то она возможна при совместном действии приливного и волнового потоков.

Сами по себе ветровые течения в перемещении наносов играют второстепенную роль. К тому же скорости их, как известно, падают с глубиной. Поэтому транспортирующая способность ветровых течений чрезвычайно низка и в лучшем случае ограничивается частицами пелитовой размерности.

Таким образом, весь осадочный материал, поступающий в акваторию, распределяется по ее дну и берегам волновыми и приливыми процессами. Резкое уменьшение содержания мелкозернистого материала в донных осадках, где практически отсутствует растительный детрит, происходит в результате интенсивных выносных течений, обеспечивающих транспортировку мелкозернистого материала далеко за пределы мелководья в открытую часть шельфового бассейна. Сравнение объемов приносимого осадочного материала и отложенного в аккумулятивных формах за многие годы свидетельствует об общем отрицательном балансе наносов. Общая тенденция к выносу грунтовых масс подтверждается малыми мощностями песков в северной части губы и выходами коренных пород на значительном пространстве.

Преобладание процессов выноса осадочного материала преимущественно пелитовой и мелкой алевритовой размерностей можно объяснить превышением скоростей отливного течения над течением приливым.

Течения приливного типа, охватывающие всю водную толщу, определяют глубокую переработку

осадочного материала практически на всей акватории, вплоть до максимальных глубин водоёма. Такие условия, как принято считать, характерными для морей с сильными приливо-отливными течениями, образующими в совокупности с волнением единое «волноприливное поле», в котором обломочный материал может достаточно легко перемещаться во взвеси.

Сформулируем некоторые выводы:

- значительное превышение нормальной волноэнергетической составляющей над вдольбереговым вектором свидетельствует о преобладании процессов размыва над процессами переноса;

- при интенсивных северных ветрах на акватории губ в движение могут вовлекаться частицы до алевритовой размерности включительно. Крупнообломочные частицы размером более 10 мм. могут транспортироваться лишь в пределах локальных прибрежных участков.

При южных ветрах волновые скорости достаточны для переноса обломков пород до 50 мм на глубинах 3 м, до 1 мм на глубинах 18 м и до 0,1 мм – на глубинах 28 м. Частицы размером 0,001 мм и менее в массовом количестве выносятся и отлагаются за пределами губ [7].

2. Оценка влияния прибрежных волновых потоков как наносодвижущего фактора

Особого внимания требуют динамические процессы, приуроченные непосредственно к прибрежной полосе моря – зоне мелководья. Часть ее, напрямую примыкающую к суше, называют подводным береговым склоном. Его внешняя граница может смещаться в зависимости от силы шторма, т.е. от существующих на данный момент параметров ветровой волны. Чем сильнее шторм, тем дальше в сторону моря сдвинута эта граница. Особенность названного участка состоит в том, что с приближением волны к берегу, по мере падения глубин, усиливается влияние подстилающего дна, в виде силы трения относительно его поверхности. Трёхмерная ветровая волна под влиянием торможения деформируется, приобретая ассиметричную форму, превращаясь при этом в двумерную. С дальнейшим уменьшением глубин волна трансформируется в виде рассыпания, частично дробясь на более мелкие волны (эффект скользящего буруна), и в итоге разрушается (брейкер или ныряющий бурун). Остатки «агонизировавшей» волны завершаются накатом вдоль уреза по типу затухающего бора в виде пенных водных языков. Накопленная энергия волновых колебаний в этом сложном процессе преобразуется во временные штормовые потоки с высокими значениями скоростей (до двух метров в секунду и более). Это особый вид переноса водных масс известен как волновые энергетические течения. Именно с данным видом динамических процессов прибрежной зоны и связаны в основном проблемы береговой инженерии.

Внимание на особую роль потоков названного происхождения обратили еще в начале 20-го века, в 1933 году датский профессор Мунх-Петерсен утверждал, что «...местные береговые течения, которые непосредственно вызываются действием ветра, не имеют какого-либо особого влияния на движение наносов вдоль датских берегов... В первую

очередь перемещение береговых наносов обусловлено движением волн в соединении с вызванными ими течениями» [11].

Несколько позже В.П. Зенкович указывал на то, что в прибрежной зоне моря «действуют только временные штормовые потоки и только одновременно с волнением, причём направление и скорость этих течений не связаны с общей циркуляцией воды данного бассейна. Эти штормовые течения являются временным, но очень мощным агентом переноса песка» [12].

Большинство специалистов связывают возникновение таких течений с вдольбереговой составляющей потока волновой энергии. При этом не стоит отделять энергетические течения от близкого по типу переноса водных масс у берега, известного как градиентные течения. Такие течения формируются за счёт неравномерного нагона вод непосредственно у береговой черты. В процессе их совмещения с энергетическими течениями образуются временные потоки смешанного типа.

Ниже представлен набор наиболее распространённых расчётных формул для количественной оценки обозначенных явлений. Так или иначе, но при косом подходе волн к береговой черте, то есть под определённым углом, создаётся параллельный поток количества движения. Эта продольная сила и служит фактором, формирующим вдольбереговые потоки «torrents». Величина их должна быть пропорциональной скорости диссипации энергии.

В.П. Зенкович в своём капитальном труде, посвящённом вопросам развития и динамики морских берегов, не обходит стороной настоящую тему [9]. Опираясь на работу трёх американских авторов Путмана, Мунка и Трейлора, исследователь предлагает собственное выражение для расчёта обозначенных течений, возникающих в прибрежном волновом потоке в фазы установившегося волнения:

$$v = \frac{1}{k} \cdot c \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{(1 - 2,61 \cdot (k)^2 \cdot \delta \cdot \tan(\beta) \cdot \cos^2(\alpha) \cdot f)} \quad (4)$$

Где, c – фазовая скорость распространения гребней волн; δ – крутизна волны $\left(\frac{h}{0,5\lambda}\right)$; f – суммарный коэффициент трения; α – угол подхода волны к берегу; β – средний угол уклона морского дна; k – некий эмпирический коэффициент, физический смысл которого автором не раскрывается.

Решающее значение здесь придаётся таким характеристикам, как фазовая скорость распространения волнового гребня, крутизна волны, а также характер усреднённого уклона морского дна. [15].

Наконец, оригинальная версия расчёта прибрежных энергетических течений, предложена И.Ф. Шадриним:

$$v = 2,5 \frac{\rho h^2}{AT} \sqrt{gh} \cdot \tan(\beta) \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

Где: ρ – плотность воды; h – ср. высота волны; g – ускорение силы тяжести; β – средний угол уклона морского дна; α – угол подхода волны к берегу; T – средний период волны; A – коэффициент турбулентного обмена. [16].

$$v = k \cdot \sqrt[3]{\frac{\tan(\beta) \cdot h^2 \cdot \sin(2\alpha)}{T}} \quad (1)$$

$$k^3 = \frac{0,871 \cdot g \cdot s}{n}$$

Где n – коэффициент шероховатости дна, s – часть волновой энергии, возбуждающей течение, h – ср. высота волны, β – средний угол уклона морского дна, α – угол подхода волны к берегу.

Несколько иной подход к данному вопросу можно обнаружить в классической монографии Ф. Шепарда «Морская геология». По Ф. Шепарду скорость прибрежных энергетических течений со ссылкой на теорию одиночных волн мелководья Мунка, должна подчиняться следующей зависимости:

$$v = \frac{ql}{H^2} \cdot \tan(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

Где: q – объём воды, приходящийся на единицу длины волнового гребня; l – расстояния между струями поперечных разрывных течений, тормозящих вдольбереговой перенос; α и β – те же обозначенные ранее углы; H – глубина моря в месте забурирования [13].

Касаясь более современных аналогичных выражений, можно выделить следующие зависимости.

Максимчук, например, используя уравнение Бернулли, предлагает собственный расчётный вариант скорости прибрежных энергетических течений:

$$v = 0,555 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sqrt{(g \cdot \cos(\alpha))} \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda h}{n(1 + \tan^2(\beta))}} \quad (3)$$

Где: α – угол подхода волны к берегу; g – ускорение силы тяжести; h – ср. высота волны; λ – ср. длина волны; β – средний угол уклона морского дна; n – коэффициент шероховатости подстилающего дна [14].

В ином подходе, предлагаемом В.Б. Дроздовым, расчётная формула, выглядит несколько иначе:

Приведённые выше зависимости и их интерпретация удачно согласуются с натурными наблюдениями, выполненными некогда волновой лабораторией Института гидрологии и гидротехники АН УССР. По их результатам была выведена схожая по смыслу формула продольной составляющей скоростей прибрежного потока:

$$v_x = 0,4 \cdot \sqrt{gh_{гд}} \cdot \sqrt{\sin(2\alpha)} \quad (6)$$

Где, v_x – продольная составляющая скорости прибрежного потока; $h_{гд}$ – высота волн на глубокой воде; α – угол между лучом подхода волн глубокой воды и нормалью к линии берега [16].

Обращает на себя внимание единая позиция авторов в отношении ведущей роли в рассматриваемом процессе таких базовых характеристик, как высота волны (h); средний уклон прилегающего морского дна (угол β) и некий усреднённый угол подхода волн к береговой черте (острый угол α).

Отдельно отметим, что в случае введения в уравнения величин $\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$ наиболее интенсивно вдольбереговой перенос должен проявляться, при подходе волн к урезу под углом в

450°. Соответственно, в случае нулевого угла подхода при строго перпендикулярной ориентации волновых лучей по отношению к береговой линии процесс вдольберегового движения должен затухать. Одновременно, чем более пологим является конкретный участок дна, выраженный углом его наклона $\tan(\beta)$, тем меньшие значения скоростей вдольберегового переноса водных масс можно наблюдать. Получается, что, у крутых скалистых берегов с приглубым поперечным профилем дна, т.е. при солидных значениях тангенса, волновая энергия концентрируется в узкой, «прижатой» к берегу полосе. В подобных случаях наблюдается формирование прибрежных волновых потоков со скоростями, сопоставимыми по величине с горными реками. Происхождение описанных выше энергетических течений и их количественные характеристики в контексте настоящей статьи вызывают особый интерес. В первую очередь связано это с тем, что данный вид течений представляется главным фактором массового переноса твёрдого материала. Т.е. может служить основой для расчётов расхода морских наносов.

В целях количественной оценки мощности твёрдых потоков в рамках инженерной гидрологии также был разработан ряд эмпирических выражений. Одной из первых попыток стала эмпирическая формула профессора Мунх-Петерсона, которая выглядит следующим образом:

$$G = \frac{k\alpha}{8} h^2 \cdot L \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

Где α – угол подхода волны; h – средняя высота волны; L – длина волны; k – некий коэффициент, величина которого определяется крупностью частиц подстилающего донного грунта и крутизной пляжа.

Т.е. определяющими факторами в данном процессе представлены те самые волновые высоты, и углы их подхода к берегу [11].

Далее следует выборочно остановиться на выводах, сделанных П. Комаром [16]. Автор исходит из теоретического обоснования зависимости твёрдого расхода (G) в весовых единицах от потока волновой энергии, поступающей в зону разрушения волн, а также от угла подхода волн к берегу. В результате для выражения искомого весового расхода им предложена следующая формула:

$$G = k \cdot (E \cdot cn) \cdot \sin(\alpha) \quad (8)$$

Где k – безразмерный коэффициент (близкий к 0.77); E – плотность волновой энергии; cn – групповая волновая скорость; α – уже известный нам угол подхода волн к зоне разрушения.

В свою очередь В.Л. Максимчук представляет расход наносов в следующем виде:

$$G = 1,2 \cdot 10^{-5} h^2 \lambda \sqrt{\frac{g}{d_{cp}}} \cdot \sin(2\alpha) \quad (9)$$

где h и λ – соответственно: высоты и длины волн на глубокой воде; α – угол между волновым лучом и нормалью к линии берега; d_{cp} – средняя крупность частиц грунта. [14].

Б.А. Пышкин несколько изменил данное выражение, учитывая влияние на расход наносов ко всему прочему характера уклона дна – $m_y = \cot(\beta)$ [17].

$$G = 10^{-4} \left(\frac{h\lambda}{m_y^{0,75}} \right) \cdot \sqrt{\frac{g}{d_{cp}}} \cdot \sin(2\alpha) \quad (10)$$

При анализе перечня представленных эмпирических выражений, несмотря на их видимую

сложность, аналогично просматривается чёткая функциональная связь с главными штормовыми характеристиками: в первую очередь размерами волн, а также углами их подхода к береговой черте. Однако, наибольшую популярность в отечественной инженерной практике приобрели несколько иные формулы, базирующиеся на так называемом ветроэнергетическом или гидрометеорологическом методе.

В научную терминологию была введена условная величина T – наносодвижущая сила, с помощью которой осуществлялись попытки с той или иной степенью достоверности получать количественные характеристики вдольбереговых потоков (прежде всего из песчаного материала). Предполагалось, что такой подход даст возможность прогнозировать целый ряд явлений прибрежной зоны, таких как заносимость подходов каналов, случаи перекрытия наносами дюкерных траншей, блокировка прибрежных водозаборных ковшей, в том числе и на входах в гавани и бухты.

Общепризнанным на данном этапе стал метод Р.Я. Кнапса, основанный на анализе гидрометеорологической обстановки в заданном районе побережья за те или иные промежутки времени:

$$T = \sum t' = \sum [\rho w^3 \sqrt[3]{D} \cdot \xi] \cdot \beta \quad (11)$$

В качестве основного энергетического аргумента в предложенной формуле была принята скорость ветра w , возведённая в третью степень, что физически означало, как мы полагаем, работу ветрового потока [18].

Близкое по смыслу выражение было предложено Н.Д. Шишовым, отличающееся лишь в показателе степени при величине w :

$$T = \sum t' = \sum [\rho w^2 \sqrt[3]{D} \cdot \xi] \cdot \beta \quad (12)$$

Где, t' – румбовая наносодвижущая сила; ρ – повторяемость ветра данного румба, %; w – скорость ветра данного румба, м/с; D – длина разгона волн данного румба, км; β – коэффициент, характеризующий сроки расчётного периода [19].

Однако более убедительной представляется формула, предложенная в своё время специалистами Союзморпроекта [20],

$$T = \sum t' = \sum [\rho F_w \cdot \sigma \cdot k \cdot f(\alpha)] \cdot \beta \quad (13)$$

Где, F_w – величина потока энергии волн, вызываемых ветром данного румба; ξ , k и $f(\alpha)$ – эмпирические коэффициенты, учитывающие «неравноценность» румбов в зависимости от направления ветра; σ – поправка на длину разгона волн.

Здесь использованы представления о спектральном строении морского волнения, когда поток волновой энергии, вызываемый «гуляющим» ветром, рассматривается в расширенном секторе, т.е. в интервале $\pm 90^\circ$ от генерального ветрового вектора. Румбовый поток волновой энергии (F_w) в зависимости от характера волнения может быть выражен по-разному. Данный процесс по своим характеристикам бывает неустановившимся (фазы зарождения или затухания штормов) и установившимся (фаза их стабилизации).

При неустановившемся волнении величину (F_{ny}) вычисляют по формуле:

$$F_{ny} = \frac{4,19}{10^5} w^{\frac{11}{3}} t, \quad (14)$$

Где t – время в часах.

В последнем варианте расчёт ведётся отдельно для части сектора прямого воздействия, где проекции составляющих потока энергии на касательную к берегу совпадают по направлению с проекцией генерального направления, т.е. действуют в пределах активного сектора. В свою очередь части сектора, в которых направления проекций имеют обратный знак, также рассчитываются отдельно, поскольку относятся к зонам обратного воздействия – к встречным секторам. Они должны ослаблять суммарный наносодвижущий эффект. Поэтому для большей достоверности их также логично принимать во внимание в расчётном процессе. Общеизвестно, что показатель степени при величине (w) для потока энергии установившегося волнения равен трём, а для неустановившегося – приблизительно четырём (порядка 3.7), что как раз и отражено в методе Союзморниипроекта. Занижение показателя степени при скорости ветра, во-первых, нарушает физический смысл расчётных формул, а, во-вторых, ослабляет роль штормовых ветров как основного наносодвижущего фактора.

Завершая данную тему, необходимо добавить, что многие используемые в предлагаемых расчётных методах эмпирические коэффициенты добыты опытным путём в лабораторных лотках и бассейнах и апробированы в дальнейшем в природных условиях.

В процессе эксплуатации планируемого порта с условным названием Индига или Ненецк, учитывая изложенные выше зависимости, следует выделить как фактор, способный создавать на выходе за пределы гавани реальные навигационные помехи вопрос стабильности подходов глубин, кроме того учитывая природные особенности региона, всегда остается во внимании фактор влияния ледовых скоплений.

О стабильности глубин в пределах подходов водных путей

В первую очередь это касается состояния водных путей на подходах к губе Княжья, где актуальным может оказаться вопрос о нарушении стабильности глубин (обмелении) в местах условного фарватера. В связи с этим главное внимание следует уделить участку побережья западного отрога губы « $m1 - m2 - m3$ » с внешней её стороны и оконечности мыса Попова на противоположном берегу – « $m4$ » (Рис. 2).

Исходя из логики предложенных выше эмпирических выражений (формулы 1 – 14), рассматриваемый участок, сложенный песчаным материалом, должен быть причисленным к зоне высокой динамической активности, учитывая условия интенсивного волнового воздействия, есть основания предполагать возможность формирования в периоды штормов на данном отрезке берегового контура временных вдольбереговых потоков. Связано это с характером розы ветров и экспозицией береговой линии по отношению к странам света. В тёплый период года в условиях свободной ото льда акватории за счёт действия северо-западных ветров формирование прибрежных штормовых потоков неизбежно. С учётом местных ветровых характеристик такие потоки должны иметь односторонний характер. Последнее связано с экспозицией контуров береговой линии к векторам активных ветров.

С западной стороны побережья, перед входом в губу Княжья, вдольбереговой перенос твёрдого материала осуществляется с запада на восток. Одновременно, с противоположной стороны, у оконечности мыса Попова, преобладающим является движение с севера на юг (Рис.2). Подобная режимная особенность вполне может способствовать отложению песчаных масс в створе полукilометрового зазора между западным отрогом губы Княжья и оконечностью мыса Попова. Подтверждение – наличие на входе в акваторию двух встречных аккумулятивных образований – песчаных кос.



Рис. 2. Устьевая часть реки Индига, включая Губу Княжья

Есть основание рассматривать процесс их дальнейшего развития как потенциальную угрозу блокировки будущей судоходной трассы песчаными перемычками.

Дело в том, что подобные ситуации являются типичными для многих морских побережий, независимо от их широтного расположения.

На побережье Восточной Балтики твёрдые потоки в периоды ветровой активности способны, к примеру, вызывать заносимость каналов [21, 22]. Похожим примером может послужить процесс заносимости водозаборного ковша Сахалинской ГРЭС на побережье Охотского моря [18, 19].

Нельзя полностью исключить существование аналогичных явлений и на входе в губу Княжья. Следует подразумевать именно процессы барообразования. Приведенный анализ природных особенностей позволяет утверждать, что такого рода процессы характерны и для указанного побережья. При исследовании на плане контуров береговой линии по всему южному участку Чёшской губы обращает на себя внимание губа Васькина, к юго-западу от устья Индиги. Акватория похожего по типу объекта с внешней стороны почти полностью перекрыта песчаной косой (Рис. 3).

Подобное в перспективе может случиться и на входе в рассматриваемую губу Индига. Вероятное развитие природных процессов вдоль побережья требует необходимости на предпроектной стадии работ особое внимание уделить вопросу стабильности глубин на данном участке мелководья.

Настоящую актуальность вопрос может приобрести при проектировании судоходных трасс. Внимание к существующим аккумулятивным образованиям и контроль динамики их развития должно послужить в будущем одной из приоритетных мер по безопасности мореплавания.

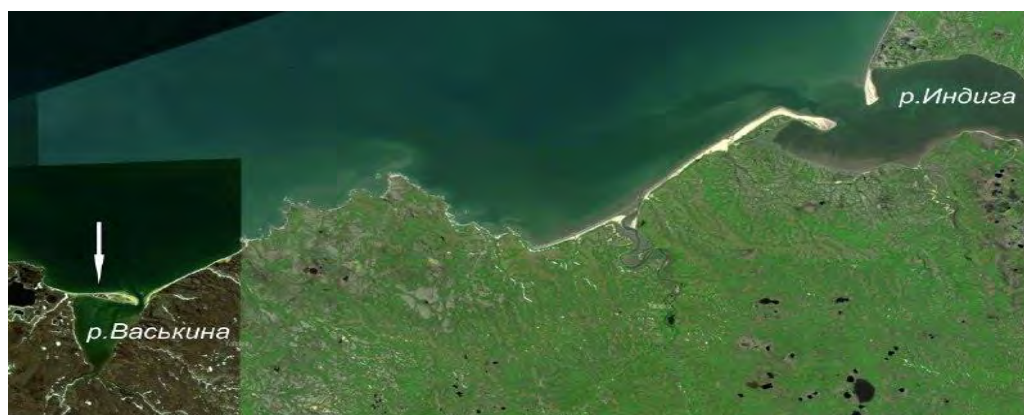


Рис. 3. Пример блокировки акватории на входе в губу Васькина

Однако, в качестве существенной оговорки, следует обратить внимание на тот факт, что приведённые ранее примеры заносимости, более точно – блокировки, упомянутых выше прибрежных объектов относятся к водоёмам со слабым приливным режимом. В случае же с Губой Индига, интенсивностью влияния природных процессов на работу порта будет значительно ниже. Мощности твёрдых вдольбереговых потоков здесь в ежегодном измерении по количественным показателям резко снижены, во-первых, за счёт волногасящего эффекта в периоды длительных покрытий акватории льдом. Во-вторых, твёрдый осадочный материал по данным натурных наблюдений, представленных выше, под действием волн в сочетании с мощными приливными процессами перемещается в противоположном от берега направлении.

3 Обоснование предложений по установке инженерных конструкций волногасящего типа

На открытом западном участке побережья бухты Индига, непосредственно у входа в губу Княжья, целесообразно возведение комплекса оградительных сооружений типа: «мол – волнолом» (Рис. 4).

Предназначение первой части оградительного сооружения (волнолома) подразумевает описанный выше эффект внешней блокировки берега. Его цель – создание теневой зоны для образования переиры, с целью перекрытия западного потока наносов (Рис. 4). По мере формирования песчаной массы накапливаемый на теневом участке материал можно использовать для отсыпки на заболоченных участках суши. Лабораторные исследования, проведенные с целью определения наиболее рационального расположения гребней подобных волноломов относительно уровня воды, показали, что при гребнях, приподнятых к среднему уровню моря, получается наибольший эффект, нежели при вариантах с надводными конструкциями. Т.е. для достижения ожидаемого результата слишком массивные сооружения не нужны, достаточно применение конструкции частично волногасящего типа.

Протяжённость такого сооружения в метрах должна быть близка к дистанции между берегом и местом его установки. По характеру проницаемости предлагаемый волнолом целесообразно возводить в

виде сплошной преграды, полностью перекрывающей толщу воды от поверхности до дна.

Вторую часть оградительного сооружения следует осуществить по типу мола. В качестве его первичной функции предполагается защита причальных линий от прямого волнового воздействия. Одновременно, его конструкция может быть спроектирована в форме бимола, т.е. в виде двух параллельных друг другу преград с определённым зазором между ними. Внешняя, по отношению к волновому полю, преграда должна быть незначительно приподнятой над поверхностью воды, а в поперечном сечении иметь откосный профиль. Подобный тип конструкции обеспечивает свободные заплески штормовой волны в промежуточную часть сооружения. В свою очередь, задняя часть конструкции волноотбойного назначения должна значительно возвышаться над водой, одновременно выполняя функцию «струенаправляющей». Размеры промежуточного поперечного сечения, обеспечивающие свободное пространство, рассчитываются в зависимости от исходных гидрологических характеристик. Для большей устойчивости заднюю часть сооружения надёжнее спроектировать в свайном варианте.



Рис 4 Предлагаемый комплекс оградительных сооружений типа «мол – волнолом»

В процессе волновых заплесков, по мере нагнетания водных масс во внутреннем пространстве желоба, там будет формироваться мощная струя течения по типу «torrent», выполняющая функцию гидравлической завесы. В периоды штормовой активности, учитывая кинематику ледовых полей, по мере их дрейфа в обход губы Княжья, действующая струя должна

обеспечивать эффект «bypassing», предотвращая возможные ледовые заторы у входных мысов.

Заключение

Развитие транспортной инфраструктуры арктических регионов, перспективы формирования МПК совмещающих морскую и ж/д инфраструктуры в прибрежной зоне российской Арктики требуют адекватного масштаба системных исследований экологических факторов. Исследование существующих аккумулятивных образований и контроль динамики их развития, должно послужить одной из приоритетных мер по безопасности мореплавания и функционирования прибрежных объектов МПК.

Изложенные в статье материалы позволяют сформулировать ряд следующих выводов и предложений.

Морфологический анализ контуров южного побережья Чёшской губы с учётом характера формирований в её пределах аккумулятивных образований (косы у губ Васькина и Княжья), позволяет утверждать о существовании вдоль данного побережья потока наносов, ориентированного с запада на восток. При этом наносодвижущий эффект значительно ослаблен траверзе входа в губу в следствие активного приливного режима. Тем не менее, дистальные

участки существующих образований (оконечности песчаных кос) с обеих сторон на входе в губу Княжья должны периодически подвергаться контролю стабильности с помощью геодезических операций совместно с крупномасштабной батиметрической съёмкой.

Целесообразно возведению комплекса оградительных сооружений типа: «мол – волнолом» на открытом западном участке побережья бухты Индига непосредственно у входа в губу Княжья. Первая часть которого предназначена для внешней блокировки берега с целью создания теневой зоны для образования перереймы – перекрытия западного потока наносов. Вторую часть оградительного сооружения следует осуществить по типу мола, в качестве первичной функции которого предполагается защита причальных линий от прямого волнового воздействия.

Дополнительно следует отметить, по мере изменения климатической обстановки, сопровождаемой массовым таянием морских льдов с их волногасящим эффектом, может нарушиться сложившийся за многие столетия баланс между динамикой твёрдых потоков на внешнем контуре побережья и эрозионными свойствами приливных течений в их отрицательной фазе.

Литература

1. Развитие инфраструктуры морских портов Севморпути – Морские вести России / Транспортная политика [Электронный ресурс] 23.10.2023. – Режим доступа: <https://morvesti.ru/analitika/1692/105605/> дата обращения 01.02.2024
2. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 г. № 3363-р / Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года.
3. Аналитические проработки по вопросам культивирования участков морских побережий на арктических территориях и в условиях Чёрного моря. // отчет о НИР. 3 этап. Закл.) ГУМРФ 2024. № рег. 122071800023-0
4. Котенко А.Г., Кузнецова Е.Ю. К вопросу постановки проблемы защиты арктической прибрежной зоны от шумового загрязнения при развитии транспортной сети. // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2 часть 1, С. 175—183
5. Лоция Баренцева моря. Часть II. М.: ГУНИО, 1983. 279 с.
6. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей. под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб: Изд. ААНИИ, 2004. 430 с.
7. Оценка характеристик природной среды и расчётных характеристик льда в локальном районе морского перегрузочного комплекса нефти (МПКН). Отчёт о НИР. ААНИИ. № 26-1/2006, 2016. 69 с.
8. Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. С.Пб, Наука. 2007 г., 272 с.
9. Леднев В.А. Течения в Чёшской губе. Тр. ГОИН. 1951. Вып. 9, С. 3-15
10. Сведения по динамическим и геометрическим характеристикам ледяного покрова Баренцева моря. Под редакцией В.Ф. Захарова. Мурманск, 1985. 149 с.
11. Мунх-Петерсен Движение наносов вдоль берегов безливных морей. 4-ая гидрологическая конференция Прибалтийских стран. ГГИ. Л. 1934. 30 с.
12. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. Изд. АН СССР, М. 1962. 710 с.
13. Шепард Ф. Морская геология. Изд. «Недра» Л. 1969. 462 с.
14. Максимчук В.Л. Решение задачи о вдольбереговом расходе наносов с помощью уравнений штормовых течений. // Динамика волновых и циркуляционных потоков. Киев, 1966, с. 21 – 25.
15. Дроздов В.В. К методике расчёта вдольбереговых штормовых течений. // Труды Совещания по динамике берегов морей и водохранилищ. Одесса. 1959. с.87 – 95.
16. Шадрин И.Ф. Течения береговой зоны бесприливных морей. // Изд. Наука. М. 1972. 128 с.
17. Пышкин Б.А. Динамика берегов водохранилищ. Изд. 3-е. Наука думка. Киев. 1973. 413 с.
18. Кнапс Р.Я. О расчете мощности вдольбереговых потоков песчаных наносов в море. // Океанология. Изд-во Наука. 1968. вып. 5. М. С. 848 – 857.
19. Шишов Н.Д. Примеры малой заносимости открытых морских каналов. // Тр. Океанографической комиссии АН СССР. т.8, М. 1961. С 114 – 117.
20. Маркова А.Н. Сравнительная характеристика некоторых энергетических методов оценки вдольберегового перемещения наносов. // Труды СМНИИП. вып. 20.
21. Кожухов И.В. Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей в связи с нарушением нормального режима судоходства. // Эксплуатация морского транспорта. 3 (61),

2010. С. 30 – 33.

22. Кожухов И.В. Колосков Е.Н., Фирсов Ю.Г. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей. // Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. 2015, вып.4 (32), С.95-103

References

1. Razvitie infrastruktury morskikh portov Sevmorputi [Development of the infrastructure of the seaports of the Northern Sea Route]. Morskie vesti Rossii / Transportnaya politika [Elektronnyy resurs] 23.10.2023. – Rezhim dostupa: <https://morvesti.ru/analitika/1692/105605/> data obrashcheniya 01.02.2024
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 g. № 3363-r / Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035].
3. Analiticheskie prarabotki po voprosam kul'tivirovaniya uchastkov morskikh poberezhnykh na arkticheskikh territoriyakh i v usloviyakh Chernogo morya [Analytical studies on the cultivation of coastal areas in the Arctic territories and in the conditions of the Black Sea]. // otchet o NIR. 3 etap. Zakl.) GUMRF 2024. № reg. 122071800023-0
4. Kotenko A.G., Kuznetsova E.Yu. K voprosu postanovki problemy zashchity arkticheskoy pribrezhnoy zony ot shumovogo zagryazneniya pri razvitii transportnoy seti [On the issue of setting the problem of protecting the Arctic coastal zone from noise pollution during the development of the transport network]. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2 chast' 1, S. 175—183
5. Lotsiya Barentseva morya. Chast' II [Location of the Barents Sea. Part II]. M.: GUNIO, 1983. 279 s.
6. Izmenchivost' prirodnykh usloviy v shel'fovoy zone Barentseva i Karskogo morey [Variability of natural conditions in the shelf zone of the Barents and Kara Seas]. pod red. A.I. Danilova, E.U. Mironova, V.A. Spichkina. SPb: Izd. AANII, 2004. 430 s.
7. Otsenka kharakteristik prirodnoy sredy i raschetnykh kharakteristik l'da v lokal'nom rayone morskogo peregruzochnogo kompleksa nefti (MPKN) [Assessment of the characteristics of the natural environment and calculated characteristics of ice in the local area of the offshore oil transshipment complex (MPCN)]. Otchet o NIR. AANII. № 26-1/2006, 2016. 69 s.
8. Vodnye resursy sushi v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata [Land water resources in a changing climate]. C.Pb, Nauka. 2007 g., 272 s.
9. Lednev V.A. Teleniya v Cheshskoy gube [Currents in the Czech Bay]. Tr. GOIN. 1951. Vyp. 9, S. 3-15
10. Svedeniya po dinamicheskim i geometricheskim kharakteristikam ledyanogo pokrova Barentseva morya [Information on the dynamic and geometric characteristics of the ice cover of the Barents Sea]. Pod redaktsiei V.F. Zakharova. Murmansk, 1985. 149 s.
11. Munkh-Petersen Dvizhenie nanosov vdol' beregov bezlivnykh morey [Sediment movement along the shores of tidal seas]. 4-aya gidrologicheskaya konferentsiya Pribaltiyskikh stran. GGI. L. 1934. 30 s.
12. Zenkovich V.P. Osnovy ucheniya o razvitii morskikh beregov [Fundamentals of the doctrine of the development of seashores]. Izd. ANSSSR, M. 1962. 710 s.
13. Shepard F. Morskaya geologiya [Marine geology]. Izd. «Nedra» L. 1969. 462 s.
14. Maksimchuk V.L. Reshenie zadachi o vdol'beregovom raskhode nanosov s pomoshch'yu uravneniy shtormovykh techeniy [Solving the problem of long-range sediment consumption using the equations of storm currents]. // Dinamika volnovykh i tsirkulyatsionnykh potokov. Kiev, 1966, s. 21 – 25.
15. Drozdov V.V. K metodike rascheta vdol'beregovykh shtormovykh techeniy [On the methodology for calculating long-range storm currents]. // Trudy Soveshchaniya po dinamike beregov morey i vodokhranilishch. Odessa. 1959. s.87 – 95.
16. Shadrin I.F. Teleniya beregovoy zony besprilivnykh morey [Currents of the coastal zone of tidal seas]. // Izd. Nauka. M. 1972. 128 s.
17. Pyshkin B.A. Dinamika beregov vodokhranilishch [Dynamics of reservoir banks]. Izd. 3-e. Nauka dumka. Kiev. 1973. 413 s.
18. Knaps R.Ya. O raschete moshchnosti vdol'beregovykh potokov peschanykh nanosov v more [On calculating the power of long-shore flows of sand deposits in the sea]. // Okeanologiya. Izd-vo Nauka. 1968. vyp. 5. M. S. 848 – 857.
19. Shishov N.D. Primery maloy zanosimosti otkrytykh morskikh kanalov [Examples of low drift of open sea channels]. // Tr. Okeanograficheskoy komissii AN SSSR. t.8, M. 1961. S 114 – 117.
20. Markova A.N. Sravnitel'naya kharakteristika nekotorykh energeticheskikh metodov otsenki vdol'beregovogo peremeshcheniya nanosov [Comparative characteristics of some energy methods for estimating long-range sediment movement]. // Trudy SMNIIP. vyp. 20.
21. Kozhukhov I.V. Sistemnyy podkhod k izucheniyu potokov nanosov v melkovodnoy zone morey v svyazi s narusheniem normal'nogo rezhima sudokhodstva [A systematic approach to the study of sediment flows in the shallow zone of the seas in connection with the violation of the normal navigation regime]. // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 3 (61), 2010. S. 30 – 33.
22. Kozhukhov I.V. Koloskov E.N., Firsov Yu.G. Elektronnaya inzhenernaya gidrografiya i perspektivy polucheniya novykh dannykh po morfologii i geoekologii arkticheskikh morey [Electronic engineering hydrography and prospects for obtaining new data on the morphology and geocology of the Arctic seas]. // Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova. 2015, vyp.4 (32), S.95-103

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

Кузнецова Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: helhena@mail.ru

Даргис Евгений Александрович, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: dargis72@mail.ru

Скороходов Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: skorohodda@mail.ru

Никитин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Elena Y. Kuznetsova, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: helhena@mail.ru

Evgeniy A. Dargis, Associate Professor of the Department of Life Safety, Federal State Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping». 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: dargis72@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng), Professor, 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

Nikolai V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 25.04.2024.

Научная статья

УДК 519.68:15:681.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.030>

Планирование маршрутов судов на основе многомерной кластеризации данных о движении

Артемяев А.В.¹ artemyev@msun.ru, Гриняк В.М.² victor.grinyak@gmail.com,
Девятисильный А.С.³ devyatis@iacp.dvo.ru, Дудко Д.О.³ dudko@iacp.dvo.ru,
Сазонтова М.Д.³ sazontova@iacp.dvo.ru

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Владивостокский государственный университет, ³Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Аннотация. Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. В условиях насыщенного трафика навигационная безопасность может быть обеспечена только при соблюдении судами определённой схемы движения. В работе ставится задача планирования маршрута судна на акватории с интенсивным движением таким образом, чтобы он соответствовал практике судоходства, сложившейся в конкретном районе. В том случае, если правила и ограничения движения существуют неформально, перспективным путём планирования маршрута является обращение к ретроспективным данным о движении с использованием идей машинного обучения. Предлагаемый в работе метод планирования маршрутов основан на кластеризации данных о движении судов. Выделенные кластеры представляют собой области в трёх- или четырёхмерном фазовом пространстве с близкими значениями скоростей и курсов судов. На основе полученной таким образом информации формируется граф возможных маршрутов судна, вершины которого соответствуют границам выделенных кластеров и областям их пересечения, а ребра – выделенным характерным курсам судов. Каждая точка в многомерном фазовом пространстве характеризуется координатами, курсом и скоростью судна, вводится метрика расстояния между точками, для кластеризации данных о движении используется плотностный алгоритм пространственной кластеризации (DBSCAN). Обсуждается вычислительная сложность рассматриваемой задачи в условиях реальных акваторий, делается вывод о возможности конструктивного решения задачи стандартными вычислительными средствами. Приводится пример решения задачи на реальных данных о движении судов в Сангарском проливе, который свидетельствует о пригодности использования разработанных алгоритмов в практике судоходства.

Ключевые слова: безопасность судоходства, управление движением судов, система установления путей движения, интенсивное движение, планирование маршрутов, кластеризация, алгоритмы на графах.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка алгоритмов автоматического расхождения судов в соответствии с МППСС-72, оценка их эффективности и безопасности».

Для цитирования: Артемяев А.В., Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Дудко Д.О., Сазонтова М.Д. Планирование маршрутов судов на основе многомерной кластеризации данных о движении, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 270—278. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.030

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.030>

Ships route planning based on multidimensional clustering of traffic data

Andrey V. Artemyev¹ artemyev@msun.ru, Victor M. Grinyak² victor.grinyak@gmail.com,
Alexander S. Devyatisilyi³ devyatis@iacp.dvo.ru, Dmitry O. Dudko³ dudko@iacp.dvo.ru,
Maria D. Sazontova³ sazontova@iacp.dvo.ru

¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, ²Vladivostok State University,

³Institute of Automation and Control Processes FEBRAS

Abstract. The paper is devoted to the problem of ensuring the safety of vessel traffic in marine areas. In conditions of heavy traf-fic, navigational safety can be ensured only if ships adhere to a certain traffic pattern. The work sets the task of planning a vessel's route in water areas with intense traffic in such a way that it corresponds to the shipping practice that has de-veloped in a particular area. In the event that traffic rules and restrictions exist informally, a promising way to plan a route is to use historical traffic data using machine learning ideas. The route planning method proposed in this work is based on clustering data on vessel movement. The selected clusters represent areas in three- or four-dimensional phase space with similar speeds and courses of ships. Based on the information obtained in this way, a graph of possi-ble vessel routes is formed, the vertices of which correspond to the boundaries of the selected clusters and the areas of their intersection, and the edges correspond to the selected characteristic courses of the vessels. Each point in the mul-tidimensional phase space is characterized by the coordinates, course and speed of the vessel, a distance metric be-tween points is introduced, and a density spatial clustering algorithm (DBSCAN) is used to cluster motion data. The computational complexity of the problem under consideration in the conditions of real water areas is discussed, and a conclusion is drawn about the possibility of a constructive solution to the problem using standard computing tools. An example of solving the problem using real data on the movement of ships in the Tsugaru Strait is given, which indicates the suitability of using the developed algorithms in navigation practice.

Keywords: maritime safety, marine traffic control, traffic pattern, traffic intensity, collision risk assessment, ships flow simulation modeling, route planning, clustering, graph algorithms.

Acknowledgments: This work was supported by the program of academic leadership "Prioritet-2030", project "Development of algorithms for vessels collision avoidance in accordance with COLREGs-72, assessment of their effectiveness and safety".

For citation: Andrey V. Artemyev, Victor M. Grinyak, Alexander S. Devyatisilyi, Dmitry O. Dudko, Maria D. Sazontova, Ships route planning based on multidimensional clustering of traffic data, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 270—278. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.030

Введение

В последние два десятилетия автоматизация судоходства совершила большой шаг вперёд. Так, в начале нулевых годов на основе накопленного научно-технического задела в повседневную судоводительскую практику была внедрена Автоматическая идентификационная система (АИС). Дальнейшее расширение сервисов АИС вкупе с наступлением цифровой эпохи и её принципиально новыми средствами накопления, хранения, передачи и обработки данных определило следующий уровень интеграции разнородной судоводительской информации (Е-Навигация) и свежий взгляд на проблему гражданского безэкипажного судоходства [1-3]. Сформулированный отраслевой средой перспективный путь развития судовождения через исключение человеческого фактора и применение автоматического управления и организации постоянного дистанционного мониторинга и контроля получил название А-Навигация [4].

Разработка и внедрение безэкипажных транспортных средств стали объектом пристального внимания и со стороны исследователей и инженеров, и со стороны регулирующих органов и служб. Наряду с понятиями безэкипажного или беспилотного судна было введено более ёмкое понятие автономного судна и предложена классификация судов по степени их автономности:

- судно с экипажем, с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений;
- дистанционно управляемое судно с экипажем на борту;
- дистанционно управляемое судно без экипажа на борту;
- полностью автономное судно.

Судно может иметь как одну, так несколько степеней автономности, в том числе в течение одного рейса.

В исследовательском контексте внедрение и обеспечение безопасной работы автономных судов потребует новой интерпретации всех классических задач судовождения, одной из которых является планирование маршрута перехода судна [5, 6]. Такое планирование имеет два возможных аспекта: «большой» вариант задачи — это планирование маршрута перехода между портами, и «малый» вариант задачи — планирование маршрута перехода на конкретной акватории. Последний — «малый» — вариант задачи возникает при движении судна в условиях интенсивного движения и в ограниченных водах. Основными критериями выбора маршрута здесь выступают навигационная безопасность движения и следование принятым в районе правилам и ограничениям [7].

Правила и ограничения, связанные с движением в конкретном районе судоходства, могут существовать как директивно (системы установления

путей движения судов), так и неформально, проявляя собирательный коллективный опыт плавания в тех или иных водах [8, 9]. В последнем случае перспективным путём «малого» планирования маршрута является обращение к данным о движении других судов, находившихся на акватории ранее («двигаемся так, как до нас двигались другие») с использованием идей машинного обучения. В настоящее время существует целый ряд информационных сервисов (например, *marinetraffic.com*), агрегирующих трафик по данным АИС и способных служить источником таких ретроспективных данных о движении.

В предыдущих работах авторы уже исследовали возможные способы планирования маршрутов на основе ретроспективных данных о движении судов. Например, работа [10] посвящена оценке характерных параметров движения на морской акватории. Акватория разбивается на небольшие четырёхугольные участки, после этого для каждого участка с помощью субтрактивной кластеризации оцениваются характерные значения скоростей и курсов судов. Эта информация позволяет в дальнейшем выявлять аномально движущиеся суда, которые «нарушают» актуальную схему движения акватории. Хотя такие «суда-нарушители» могут и не представлять непосредственной опасности в текущий момент времени, они способны создать опасную навигационную ситуацию в дальнейшем (например, если примут неправильную сторону движения или остановятся на фарватере).

Задача непосредственного планирования маршрута рассматривается в работах [11-13]. В статье [11] на основе выявленных путём кластеризации характерных значений курсов судов строится граф возможных маршрутов акватории. Вес рёбер этого графа назначается согласно «характерности» или «желательности» того или иного курса судна на выбранном участке акватории. Таким образом можно спланировать маршруты судов, учитывающие практику судовождения, сложившуюся на конкретной акватории. Недостатком метода служит дискретность разбиения акватории и зависимость результатов планирования маршрута от точки отсчёта начала и параметров разбиения.

В работах [12, 13] граф возможных маршрутов предлагается строить путём выборки траекторий отдельных судов, находившихся на акватории ранее. Маршруты формируются из геометрических представлений — как множество пересекающихся ломаных. В работе [12] все возможные маршруты были равнозначны, не учитывалась их изолированность или наличие в окрестности похожих маршрутов, что могло приводить к выбору хоть и подходящей, но не типичной траектории. Этот недостаток авторы пытались преодолеть в работе [13], где каждому ребру графа возможных маршрутов приписывается его «популярность»,

характеризующая близость к нему других ребер, для оценки этой близости используется природная аналогия – закон Ампера (определяющий силу взаимодействия проводников с током). Хотя метод и позволяет планировать наиболее типичный для акватории маршрут, его практическая реализация (имея в виду большие объёмы ретроспективных данных, на основе которых строится граф возможных маршрутов) характеризуется высокой вычислительной сложностью.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию методов планирования маршрутов на основе ретроспективных данных о движении судов. Как и в работе [11], предлагаемый метод основан на кластеризации данных о движении. Однако акватория не разбивается предварительно на участки, а выделенные кластеры представляют собой области в трёх- или четырёхмерном фазовом пространстве с близкими значениями скоростей и курсов судов. На основе полученной таким образом информации формируется граф возможных маршрутов судна, вершины которого соответствуют границам выделенных кластеров, а ребра – выделенным характерным курсам судов. Сформированный таким образом граф будет иметь сравнительно небольшое число вершин и ребер, что упрощает поиск на нем кратчайшего (по некоторой метрике) пути

Материалы и методы

Данные о движении судна, предоставляемые сервисами Автоматической идентификационной системы (АИС) включают в себя множество параметров, в том числе координаты, курсы и скорости судов. Характерный период обновления данных на ресурсах-агрегаторах (типа *marinetraffic.com*) – от одной до нескольких десятков минут. Представим эти исходные данные в виде множества записей вида $\{LAT_i, LON_i, SPEED_i, COURSE_i\}$, где LAT_i и LOI_i – географические широта и долгота, $SPEED_i$ и $COURSE_i$ – скорость и курс. Ставится задача выделить участки выбранной акватории, движение судов на которых характеризуется близкими скоростями и курсами, то есть кластеризации исходных данных о движении.

Введём следующую метрику расстояния между точками в четырёхмерном фазовом пространстве географических координат, скоростей и курсов:

$$d_{ij}^2 = a_R R^2(LAT_i, LON_i, LAT_j, LON_j) + a_V (SPEED_i - SPEED_j)^2 + a_K (COURSE_i - COURSE_j)^2,$$

где d_{ij}^2 – квадрат расстояния между фазовыми точками с индексами i и j ; $R^2(LAT_i, LON_i, LAT_j, LON_j)$ – квадрат длины дуги Большого круга, соединяющей точку поверхности

Земли с географическими координатами LAT_i, LON_i с точкой LAT_j, LON_j ; a_R, a_V, a_K – весовые коэффициенты. Разность $COURSE_i - COURSE_j$ доопределяется с учетом периодичности значений угла.

Сущность задачи кластеризации состоит в нахождении подмножеств объектов, лежащих близко друг к другу с точки зрения заданной метрики расстояния между ними. Имеются две интерпретации таких подмножеств как групп точек: это кластеры – «сгустки» и кластеры – области связности. В первом случае кластеры характеризуются их центрами, а границы определяемого кластером подмножества «размыты». Во втором случае кластеры – это подмножества точек с чётко обозначенными границами и входящими в них точками. Для рассматриваемой задачи будем понимать кластер как область связности в определённом фазовом пространстве. Хорошо зарекомендовавший себя метод кластеризации для такого случая – это плотностный алгоритм пространственной кластеризации (DBSCAN). Алгоритм основан на поиске в исходном массиве подмножеств точек, обладающих следующими двумя свойствами:

- каждая точка, входящая в подмножество, имеет «соседнюю» точку, расстояние до которой не выше некоторого наперёд заданного значения ε ;
- число точек, входящих в подмножество, не меньше некоторого наперёд заданного значения m . В противном случае подмножество не считается кластером.

Весовые коэффициенты a_R, a_V, a_K задаются экспертным способом исходя из особенностей конкретной выборки данных. Так, например, величина $1/a_R$ может быть равна квадрату характерного расстояния между соседними точками одной траектории; это расстояние зависит от периода обновления данных. С другой стороны, она может быть равна квадрату характерной ширины судопотока (фарватера), где суда движутся с близкими скоростями и курсами. Величина $1/a_V$ равна квадрату разности скоростей, когда они считаются близкими скоростями, например 2-3 узла. Аналогично, величина $1/a_K$ равна квадрату разности курсов, когда они считаются близкими курсами, например, 5-10 градусов. Исходя из выбранных значений a_R, a_V, a_K определяются характерные значения расстояния между «близкими» фазовыми точками d_{ij} , что даёт представление о возможном значении ε . Минимальное количество точек в кластере m также зависит от особенностей данных, в рассматриваемом случае может составлять от десятков до тысяч.

На основе выделенных по результатам кластеризации подмножеств точек формируются охватывающие их многоугольники, задающие границы областей акватории с близкими значениями скоростей и курсов судов. На рис. 1 показан схематический пример.

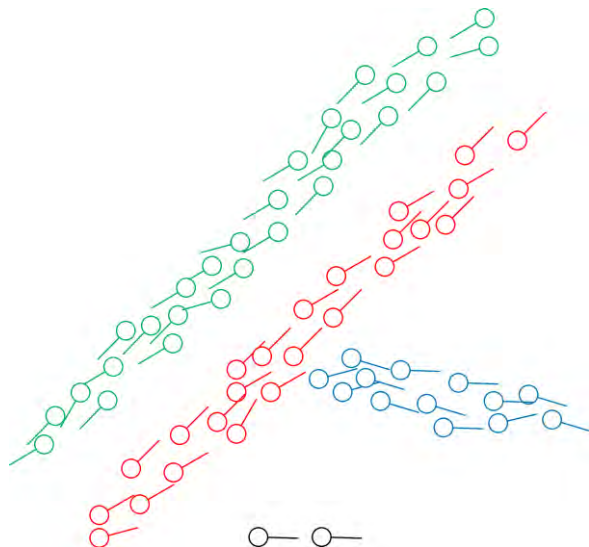


Рис. 1. Схематический пример выделения кластеров в данных о движении судов

Кружками со стрелкой показаны координаты судов, их скорость и курс. Цветом выделены те точки, что были отмечены как принадлежащие к кластерам. На данном рисунке явно выделяются три кластера: суда, движущиеся на юго-запад (зеленые), движущиеся на северо-восток (красные) и движущиеся на восток (синие). Два черных значения внизу рисунка кластера не образуют. В общем случае многоугольники, охватывающие каждый кластер, могут пересекаться. Чаще всего такие многоугольники близки к выпуклым, это обстоятельство позволяет использовать для их формирования более простой алгоритм.

Рассмотрим метод построения графа возможных маршрутов судна на основе данных об охватывающих кластеры многоугольниках. Шаги алгоритма формирования множества вершин графа будут следующими.

- Включим в множество вершин графа точки вершин охватывающих многоугольников.
- Если отрезки их сторон слишком велики, включим в множество вершин точки, принадлежащие отрезкам сторон, так, чтобы расстояние между точками не превышало значения ε .
- При наличии пересекающихся охватывающих многоугольников добавим в граф несколько точек, лежащих внутри пересечений, так чтобы

можно было хотя бы раз изменить курс при движении от границы к границе.

- При очень протяженных охватывающих многоугольниках включим в множество вершин несколько точек, лежащих внутри многоугольников, так, чтобы можно было изменить курс при движении внутри многоугольника.
- Наконец, добавим к множеству вершин точки начала и конца маршрута.

Шаги алгоритма формирования множества ребер графа будут следующими.

- Если точка начала маршрута не принадлежит ни одному из охватывающих многоугольников – добавляем в множество ребер направленное ребро до ближайшей точки, лежащей на границе многоугольника. Аналогично поступаем с точкой конца маршрута.
- Считаем, что для каждого охватывающего многоугольника определен отрезок возможных значений курса. Если для точки, принадлежащей многоугольнику, существуют точки этого же многоугольника, которых можно достичь, двигаясь возможным курсом, добавим в множество соответствующие направленные ребра. Прделаем это для всех точек многоугольника – и граничных и внутренних. В некоторых случаях (при очень протяженных охватывающих многоугольниках) можно ограничить длину ребра.
- Если имеются непересекающиеся многоугольники, то соединим ребрами их граничные точки по принципу «каждая с каждой», исключив ребра, пересекающие границы многоугольников.
- Если отрезок, соединяющий точки начала и конца маршрута, не пересекает ни одного из охватывающих многоугольников – добавляем в множество ребер соответствующее направленное ребро.

На рис. 2 показан схематический пример, иллюстрирующий построение графа возможных маршрутов судна. Имеется два пересекающихся охватывающих многоугольника, в одном из них суда плывут на восток, в другом – на северо-восток. Красным показана точка начала маршрута, зеленым – конечная точка. Синими точками показаны вершины графа, добавленные в зону пересечения охватывающих многоугольников. Пунктирными линиями со стрелками показаны ребра графа (для наглядности рисунка изображены не все возможные ребра). Из рисунка видна идея планирования маршрута от красной до зеленой точки: сначала достигаем ближайший многоугольник, движемся по одному из ребер графа до вершины, лежащей в зоне пересечения охватывающих многоугольников (на восток), затем меняем курс и движемся по одному из ребер графа до вершины – конечной точки маршрута (на северо-восток).

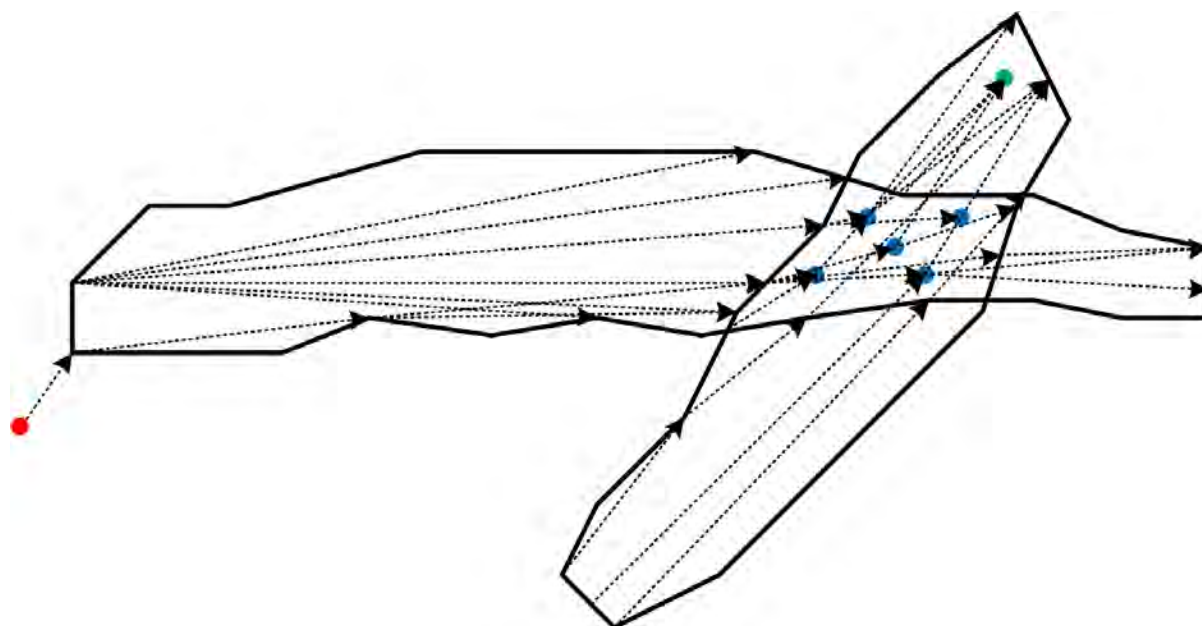


Рис. 2. Схематический пример фрагмента графа возможных маршрутов судна

Несколько слов о весе рёбер графа возможных маршрутов. В самом простом случае вес рёбер принимается равным длине дуги Большого круга, соединяющей инцидентные ребру вершины. Если требуется, чтобы суда стремились двигаться ближе к «середине» судопотока, можно скорректировать вес ребра с учетом наличия в его окрестности других рёбер (например, как предложено в работе [16]). Вес ребер также может корректироваться с учетом каких-либо дополнительных условий и эвристик, принятых для движения на конкретной акватории.

Поиск маршрута на сформированном таким образом графе может осуществляться известными детерминированными алгоритмами поиска кратчайшего пути на взвешенном графе, например, Дейкстры или Беллмана-Форда.

Таким образом, алгоритм планирования маршрутов состоит в следующем:

- Формирование выборки ретроспективных данных о движении судов на конкретной акватории, подбор параметров метрики расстояния a_R , a_V и a_K .
- Подбор параметров ε и m алгоритма кластеризации DBSCAN. Выделение подмножеств точек по результатам кластеризации.
- Формирование для выделенных кластеров охватывающих многоугольников в пространстве параметров LAT_i и LON_i (географические широта и долгота). Эти многоугольники задают границы областей акватории с близкими значениями скоростей и курсов судов.
- Формирование взвешенного направленного графа возможных маршрутов судна.
- Поиск кратчайшего пути на графе возможных маршрутов известными детерминированными алгоритмами.

Результаты

Для проведения вычислительного эксперимента по планированию маршрутов из открытых источников (marinetraffic.com) с помощью специальной программной системы [14] были собраны наборы данных о реальном движении судов на различных акваториях. На рис. 3, 4 показаны результаты расчётов маршрутов судов в районе Сангарского пролива: на этой акватории хорошо выделяется характерное движение в направлениях «север-юг» и «запад-восток». Данные были собраны в течение одной недели в летний период и содержали около 100 тыс. записей.

Кластеризация выполнялась описанным выше способом при следующих параметрах алгоритма: весовые коэффициенты $a_R = 10^{-4}$ (что соответствует характерному расстоянию между точками траекторий 100 м), $a_V = 0.04$ (соответствует характерной разнице скоростей 5 м/с), $a_K = 0.025$ (соответствует характерной разнице курсов 20°), расстояние между соседними точками ε равно 0.3, минимальное число точек в кластере m равно 50. Было выделено 32 кластера.

На рис. 3 показаны результаты разделения точек на кластеры: разные кластеры выделены разными цветами, стрелками показаны значения векторов скорости обрабатываемых записей. Хорошо видны выделенные подмножества исходных данных, соответствующие различным характерным траекторным параметрам движения.

На рис. 4 показаны соответствующие кластерам охватывающие вогнутые многоугольники, цветными стрелками показаны направления и значения средних по кластеру векторов скорости.

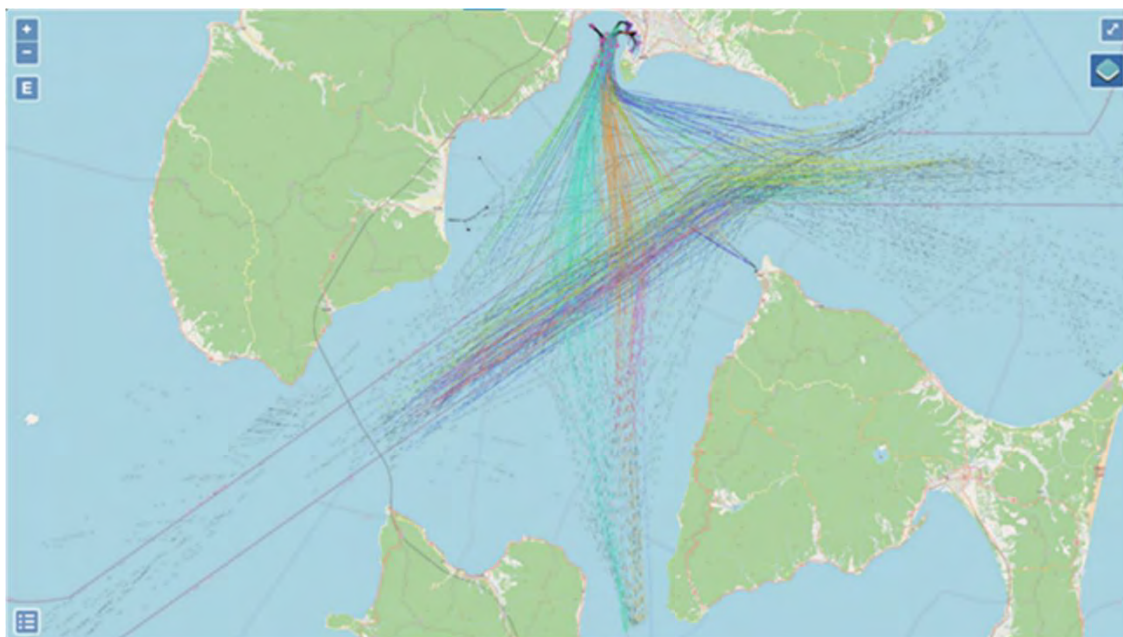


Рис. 3. Результаты кластеризации данных о движении судов (Сангарский пролив)

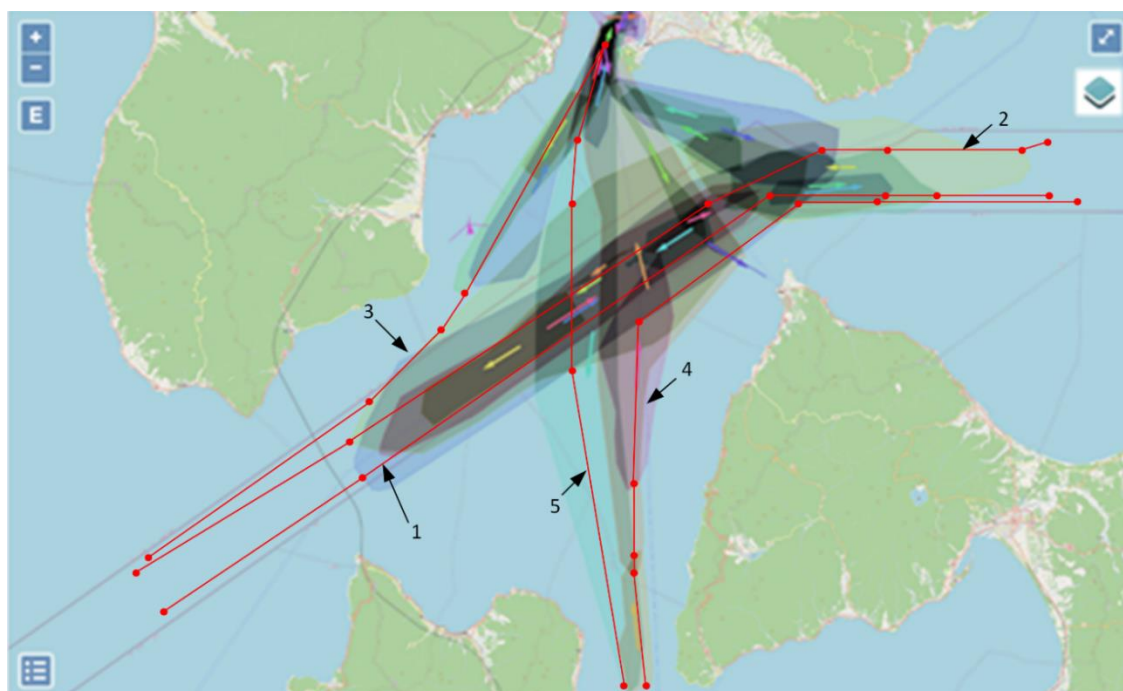


Рис. 4. Результаты выделения кластеров как охватывающих многоугольников и планирования маршрутов судов

Видно, что подмножества параметров движения устойчиво находятся в характерных местах, образуя систему пересекающихся фигур.

Также на рис. 4 представлен результат планирования маршрутов на основе вогнутых оболочек кластеров. Показаны следующие маршруты:

1. Японское море – Тихий океан.
2. Тихий океан – Японское море.
3. Хакодате – Японское море.
4. Залив Муцу – Тихий океан.
5. Хакодате – залив Муцу.

Красными точками показаны начальная и конечная точки маршрута, а также вершины графа,

через которые проходит маршрут (как правило находятся на границах охватывающих кластеры многоугольников). Красные линии – рёбра графа. Видно, что найденные маршруты вполне соответствуют характерным траекториям акватории: суда принимают нужную сторону движения (в судовождении принято правостороннее движение). Также стоит отметить сравнительно небольшое число рёбер, из которых состоят найденные маршруты, что упрощает их реализацию на практике, позволяет минимизировать число изменений курса судна.

Обсуждение

Предлагаемый способ построения графа возможных маршрутов на основе многомерной кластеризации траекторных данных показал свою эффективность и конструктивную разрешимость в рассматриваемой задаче планирования маршрутов. В отличие от кластеризации данных по курсу и скорости на каждом небольшом участке акватории отдельно (как в работе [11]), рассмотренный в настоящей работе подход предполагает выделение протяжённых областей, характеризующихся близкими значениями скоростей и курсов судов. Это позволяет выделять, например, зоны фарватеров или зоны якорных стоянок и планировать маршруты судов с учетом сложившейся практики судовождения конкретной акватории.

Основной проблемой предлагаемого подхода является подбор параметров кластеризации: максимального расстояния между точками кластера ε , минимального числа точек в кластере m и коэффициентов метрики расстояния a_R , a_V , a_K . При практической реализации рассматриваемой задачи параметры следует подбирать на основе результатов численного исследования имеющихся данных, в значительной мере – интуитивно. Вопрос о том, подходят ли параметры кластеризации данных одной акватории для данных других акваторий остаётся открытым и требует дополнительного исследования.

Рассматриваемая задача планирования маршрутов представляет собой совокупность четырёх подзадач: кластеризации данных алгоритмом DBSCAN, выделения охватывающих кластеры многоугольников, построения графа возможных маршрутов, поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. Первые три задачи характеризуются высокой вычислительной сложностью, особенно для акваторий с интенсивным разнонаправленным трафиком и сложной географией. Так, например, данные о движении в районах некоторых крупных портов Азии в течение суток содержат несколько миллионов записей. Работа с такими данными требует использования специализированных вычислительных платформ. Вместе с тем сама по себе высокая вычислительная сложность алгоритмов и большой объём данных не являются препятствием для практического использования рассмотренного подхода к планированию маршрутов, так как кластеризация данных и формирование графа возможных маршрутов могут проводиться в течение длительного времени заранее. Оперативного же решения требует только последняя задача – поиска кратчайшего маршрута на взвешенном графе. При формировании графа описанным способом маршруты будут характеризоваться сравнительно небольшим числом рёбер, для их поиска можно использовать известные детерминированные алгоритмы.

Развитие средств хранения данных и вычислений в последние два десятилетия обусловило техническую возможность анализа больших выборок ретроспективных данных трафика для решения различных задач судовождения, в том числе – задачи планирования маршрутов (как в «большом», так и в «малом» варианте). Исторически первым серьёзным исследованием на эту тему с примерами расчётов на

реальных данных была работа [15], где рассматривались особенности траекторных данных, предоставляемых сервисами Автоматической идентификационной системы, и показывается перспективность применения к ним идей кластеризации. В работе даются постановки различных задач: определения аномально движущихся судов, планирования маршрутов, оценки конфигурации судопотоков на акватории и т.д. Для решения указанных задач используются методы теории вероятностей и статистики, а также только начавшие в то время оформляться методы анализа больших данных.

В работе [16] рассматривается задача планирования маршрута (в «малом» варианте) на основе ретроспективных данных о движении. Метод решения задачи основан на разбиении акватории на небольшие участки и выявлении для каждого участка характерных скоростей и курсов судов (методами математической статистики). Далее по этим данным строится маршрут судна. Как показывают представленные в статье примеры расчётов на реальных данных получаемый таким образом маршрут может быть достаточно «изломанным» и не пригодным для практики, требует его дополнительного «сглаживания».

В статьях [7] и [17] для выделения характерных маршрутов судов на акватории используются алгоритмы кластеризации DBSCAN и K-medoids. В результате кластеризации формируются своего рода «пучки ломаных», представляющие собой «паттерны движения» конкретной акватории. Сравнение движения судна с такими характерными маршрутами позволяет выделять аномально движущиеся суда. В статьях также отмечается возможность планирования маршрутов судов на основе этих данных. Похожая задача решается и в работе [18].

Заключение

В работе рассматривается задача планирования маршрутов судов в конкретной акватории с интенсивным движением на основе ретроспективных данных о её трафике. Сформулированы общие модельные представления задачи планирования маршрутов. Отмечено, что перспективным способом решения задачи является построение графа возможных маршрутов судна с учетом сложившейся конфигурации судопотоков акватории. Формализация особенностей судопотоков делается путём кластеризации данных в многомерном пространстве «координаты – курс – скорость».

В работе предложена метрика расстояния между точками, на основе которой происходит кластеризация. В качестве метода кластеризации используется плотностный алгоритм пространственной кластеризации (DBSCAN). Предложен способ формирования множества вершин и рёбер графа возможных маршрутов судна на основе информации о выделенных кластерах. Дается оценка сложности алгоритмов кластеризации, формирования графа и поиска на нём маршрута. Отмечено, что при формализации выделенных кластеров охватывающими многоугольниками число вершин и ребер графа возможных маршрутов будет невелико, что даёт возможность реализации предложенного подхода вычислительными системами общего назначения.

Результаты моделирования задачи на реальных данных (в настоящей работе представлены результаты моделирования в Сангарском проливе) дают хорошее представление о её характерных особенностях: числе кластеров, их размерах, значениях коэффициентов метрики расстояния, параметрах алгоритма кластеризации, числе ребер и

вершин графа возможных маршрутов, свойствах выделенных маршрутов судов. Приведённый пример планирования маршрутов свидетельствует о конструктивной разрешимости задачи и пригодности использования разработанных алгоритмов в практике судовождения.

Литература

1. Ардельянов Н.П. Промежуточные результаты концепции е-навигации // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2022. – № 2. – С. 8-11.
2. Ривкин Б.С. Е-навигация. Прошло 5 лет // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. – № 1. – С. 101-120.
3. Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-1. – С. 158-165.
4. Пинский А.С. Автономное судовождение: вызовы и возможности // Морское оборудование и технологии. – 2021. – № 4. – С. 47-63.
5. Tsolakis A., Benders D., de Groot O., Negenborn R.R., Reppa V., Ferranti L. COLREGs-aware Trajectory Optimization for Autonomous Surface Vessels // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55. – № 31. – P. 269-274.
6. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., Sotnikova M.V. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing // Journal of Navigation. – 2018. – Vol. 71. – № 4. – P. 989-1010.
7. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network // Journal of Navigation. – 2019. – Vol. 72. – № 4. – P. 894-916.
8. Таратынов В.В. Целесообразность разделения морских путей / В.В. Таратынов // Морской флот. – 1969. – № 9. – С. 19-20.
9. Zhang B., Hirayama K., Ren H., Wang D., Li H. Ship Anomalous Behavior Detection Using Clustering and Deep Recurrent Neural Network // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – № 4. – P. 763.
10. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 436-449.
11. Гриняк В.М., Шуленина А.В. Кластеризация данных траекторий морских судов для планирования маршрутов через акватории с интенсивным движением // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27. – № 11. – С. 607-615.
12. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Планирование маршрутов судов на основе ретроспективных данных о движении на морской акватории // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 10. – С. 34-40.
13. Гриняк В.М., Прудникова Л.И., Артемьев А.В., Левченко Д.М. Планирование маршрутов судов по ретроспективным данным о движении на основе модельных представлений вычислительной геометрии // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 2. – С. 25-26.
14. Головченко Б.С., Гриняк В.М. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 2. – С. 156-162.
15. Pallotta G., Vespe M., Bryan K. Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: a framework for anomaly detection and route prediction // Entropy. – 2013. – Vol. 15. – P. 2218-2245.
16. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data // Journal of Navigation. – 2020. – Vol. 73. – № 3. – P. 726-745.
17. Zhen R., Jin Y., Hu Q., Shao Zh., Niktakos N. Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier // Journal of Navigation. – 2017. – Vol. 70. – № 3. – P. 648-670.
18. Tang H., Wei L., Yin Y., Shen H., Qi Y. Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model // Journal of Navigation. – 2020. – Vol. 73. – № 5. – P.1014-1035.

References

1. Ardelyanov N. (2022) Intermediate results of the e-navigation concept. Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova. 2. 8-11.
2. Rivkin B.S. (2020) E-navigation: five years later. Gyroscopy and navigation. 11.2. 176-187.
3. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpektorov A.G. (2021) A route calculation for unmanned vessel. Marine Intellectual Technologies. 54.4-1. 158-165.
4. Pinskiy A.S. (2021) Avtonomnoe sudovozhdenie: vyzovy i vozmozhnosti. Morskoe oborudovanie I tekhnologii. 29.4. 47-63.
5. Tsolakis A., Benders D., de Groot O., Negenborn R.R., Reppa V., and L. Ferranti (2022) COLREGs-aware Trajectory Optimization for Autonomous Surface Vessels. IFAC-PapersOnLine. 55.31. 269-274.
6. Wang H.B., Li X.B., Li P.F., Veremey E.I., and M.V. Sotnikova (2018) Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. Journal of Navigation. 71.4. 989-1010.
7. Zhao L., and G. Shi (2019) Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network. Journal of Navigation. 72.4. 894-916.
8. Taratynov V.P. (1969) Tselesoobraznost razdeleniya morskikh putey. Morskoy flot. 9. 19-20.
9. Zhang B., Hirayama K., Ren H., Wang D., and H. Li (2023) Ship Anomalous Behavior Detection Using Clustering and Deep Recurrent Neural Network. 11.4. 763.

10. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., and Y.S. Ivanenko (2020) Decision support for marine traffic control based on route clustering. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 12.3. 436-449.
11. Grinyak V.M., and A.V. Shulenina (2021) Marine traffic data clustering for ships route planning. Information technologies. 27.11. 607-615
12. Grinyak V.M., and A.S. Devyatisilnyi (2022) Vessel route planning based on historical traffic data of marine area. Transport: science, equipment, management. 10. 34-40.
13. Grinyak V.M., Prudnikova L.I., Artemiev A.V., and D.M. Levchenko (2023) Vessel route planning based on historical traffic data and model representations of computational geometry. Modelling, optimization and information technologies. 11.2. 25-26.
14. Golovchenko B.S., and V.M. Grinyak (2014) Information system for vessels traffic data capture. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2. 156-162.
15. Pallotta G., Vespe M., and K. Bryan (2013) Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: a framework for anomaly detection and route prediction. Entropy. 15. 2218-2245.
16. Naus K. (2020) Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data. Journal of Navigation. 70.3. 726-745.
17. Zhen R., Jin Y., Hu Q., Shao Zh., and N. Niktakos (2017) Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier. Journal of Navigation. 70.3. 648-670.
18. Tang H., Wei L., Yin Y., Shen H., and Y. Qi (2020) Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model. Journal of Navigation. 73.5. 1014-1035.

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

Артемов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая 50а, e-mail: artemyev@msun.ru

Andrey V. Artemyev, Cand. Sci. ((Eng).), associate professor of department of navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: artemyev@msun.ru

Гриняк Виктор Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Eng.), professor of department of information systems and technologies, Vladivostok State University, 41, Gogolya st., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Девятисильный Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник сектора управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Alexander S. Devyatisilnyi, Dr. Sci. (Eng), professor, navigation and control department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Дудко Денис Олегович, лаборант-исследователь сектора управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: dudko@iacp.dvo.ru

Denis O. Dudko, junior research fellow, navigation and control department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: dudko@iacp.dvo.ru

Сазонтова Мария Дмитриевна, лаборант-исследователь сектора управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: sazonтова@iacp.dvo.ru

Maria D. Sazonova, junior research fellow, navigation and control department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: sazonтова@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.05.2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 656.61.052 (075)

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.031>

Информационная поддержка обеспечения безопасности экологического взаимодействия судна и окружающей среды в процессе торможения с помощью гребного винта

Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Скороходов Д.А.¹ skorohodda@mail.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье рассмотрены особенности торможения судна с дизельной энергетической установкой посредством реверсирования гребного винта фиксированного шага. Проанализирован алгоритм выполнения этого ответственного и опасного, по возможным негативным последствиям для окружающей среды, маневра. Исследован характер торможения судна, оснащённого турбозубчатым агрегатом в качестве энергетической установки. Приведены дифференциальные уравнения структуры: судно-двигатель-гребной винт, для использования в системе информационной поддержки. Сформировано уравнение движения судна, перемещающегося по инерции, а также выполнена оценка времени торможения судна с помощью гребного винта. Определён перечень исходных данных для ввода в систему информационной поддержки судоводителя в реальных условиях торможения. Рассмотрены особенности торможения судна с главным турбозубчатым агрегатом (ГТЗА) и судна, оборудованного винтом регулируемого шага (ВРШ). Показано, что выработать наиболее эффективный режим для управления ВРШ при реверсе способна система интеллектуальной поддержки (СИП) движения судна.

Ключевые слова: торможение, выбег, реверс, экология, гребной винт, энергетическая установка, контр - воздух, режим управления, система интеллектуальной поддержки.

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

Для цитирования: Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Информационная поддержка обеспечения безопасности экологического взаимодействия судна и окружающей среды в процессе торможения с помощью гребного винта, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 279—285. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.031

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.031>

Information support for ensuring the safety of the ecological interaction of the vessel and the environment during braking using a propeller

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. Annotation. The article discusses the features of braking a vessel with a diesel power plant by reversing a fixed-pitch propeller. The algorithm of performing this responsible and dangerous maneuver, with possible negative consequences for the environment, is analyzed. The character of braking of a vessel equipped with a turbine-toothed unit as an energy installation is investigated. The differential equations of the ship-engine-propeller structure are given for use in the information support system. The equation of motion of a vessel moving by inertia has been formed, and the time of deceleration of the vessel using a propeller has been estimated. A list of initial data has been determined to introduce a system of information support for the skipper in real braking conditions. The features of braking a vessel with a main turbine gear unit (GTZ) are considered and a vessel equipped with an adjustable pitch screw (HRSH). It is shown that the intelligent support system (IPM) for vessel movement is capable of developing the most effective mode for controlling the SRS during reverse.

Keywords: braking, run-out, reverse, ecology, propeller, power plant, counter-air, control mode, intelligent support system.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 18 January 2024 № 075-03-2024-666).

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorohodov, Information support for ensuring the safety of the ecological interaction of the vessel and the environment during braking using a propeller, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 279—285. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.031

Введение

Маневрирование изменением скорости судна хорошо изучено для судов, оснащённых винтом фиксированного шага (ВФШ) или винтом регулируемого шага (ВРШ) [1-4]. При этом, например, нормальное торможение с помощью реверса винта зависит от характеристик судна и винта, а также типа главного двигателя и может, с утратой контроля движения судна при торможении, привести к экологической катастрофе [5]. С учётом роста интенсивности движения по Северному морскому пути (СМП) газовозов и нефтеналивных судов вероятность подобных аварийных ситуаций возрастает. Анализ литературы, относящейся к ходкости судна и выполнению им различных маневров, как по скорости, так и по курсу, показывает, что данной проблеме не было уделено должного внимания.

Опрос судоводителей показал, что возможность торможения судна с помощью реверса гребного винта известна, но особенности этого манёвра, влияющие на безопасность торможения, знают немногие. Целесообразно, поэтому, к уже имеющимся на судах станциям управления движением (Maneuvering Control Station) добавить несложное программное обеспечение, которое будет вырабатывать объективные рекомендации траектории движения и отображать её на экране станции управления с учётом характеристик судна и внешних условий, в которых реализуется торможение.

Торможения судна с помощью реверсирования гребного винта

Важнейшими характеристиками маневра торможения судна является время - t , путь торможения (выбег) - $L(t)$ и скорость - $v(t)$ [4,6]. Выбег судна зависит от следующих факторов: водоизмещение, скорость в начале торможения, тип главной энергетической установки (ГЭУ), её мощность и характеристики гребного винта.

На судах с дизельной ГЭУ и винтом фиксированного шага реверсирование выполняется снижением частоты вращения винта до 25 – 35 % от номинальной, что соответствует снижению скорости судна до 60 – 70 % скорости полного переднего хода, а затем реверсируется ГЭУ. При этом путь, проходимый судном в режиме пассивного торможения, т.е. до начала работы двигателя на задний ход, может значительно превышать половину полного тормозного пути, так как продолжительность этого периода может составлять 2-3 минуты и более. Если же начальная скорость не превышает 60-70% скорости полного переднего хода, то реверсирование происходит достаточно быстро и определяется временем развития полной мощности заднего хода, что практически совпадает со временем перекачки сектора газа на полную мощность и составляет не более 15 с.

На судах с турбозубчатым агрегатом (ТЗА) и с ВФШ ротор турбины можно затормозить подачей контр - пара на турбину заднего хода, что займёт не

более 1 мин, что значительно быстрее, чем на судах с дизельной ГЭУ. Однако мощность, развиваемая турбиной заднего хода, в 2 раза меньше мощности переднего хода.

Торможение с помощью гребного винта, создающего отрицательный упор при изменении направления частоты вращения, называется активным торможением. В случае активного торможения выбег судна зависит от времени перехода к полной мощности заднего хода.

В общем случае дифференциальные уравнения системы «судно-двигатель-гребной винт» имеют вид:

- судно – двигатель:

$$m_1 \frac{dv}{dt} = -R(v) \pm P_e(v, \omega); \quad (1)$$

- винт – двигатель:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_g(\omega) - M_c(v, \omega) - M_{тр}, \quad (2)$$

$$\text{где: } m_1 = m(1 + \lambda_{11}) = \frac{D}{g}(1 + \lambda_{11});$$

λ_{11} - коэффициент присоединённой массы, значение которого при различной скорости движения судна вычисляется по функции А.Н. Шабалова от коэффициента полноты шпангоута, ширины и осадки судна [3]; D - водоизмещение судна; v - скорость судна; P_e - движущая (тормозящая) сила гребного винта, имеющая знак «+» при совпадении её направления с направлением движения судна и знак «-» при противоположном направлении; m - масса судна; ω - угловая скорость вращения винта; J - момент инерции системы: двигатель – гребной вал – винт, равный сумме приведённых к оси вала моментов инерции вращающихся масс и присоединённого момента инерции гребного винта; M_g - крутящий момент, развиваемый двигателем при постоянной подаче топлива; M_c - момент сопротивления гребного винта; $M_{тр}$ - приведённый момент от сил трения, принимаемый в первом приближении постоянным.

Рост размерений судна при прочих равных условиях приводит к увеличению выбега при торможении и его продолжительности. Это объясняется двумя факторами: увеличением силы инерции судна, которая зависит от массы, преодолеваемой для обеспечения реверса и уменьшением удельной мощности энергетической установки (ЭУ), используемой для торможения судна.

Придание определённого направления движению судна достигается изменением упора, создаваемого гребным винтом. Упор можно изменить следующими способами:

- устройством между нереверсивным главным двигателем и винтом специальной реверсивной муфты;

- применением электродвижения, когда главные судовые двигатели вращают генераторы, а электрическая энергия поступает на реверсивные гребные электродвигатели;

- применением винтов регулируемого шага (ВРШ).

В этом случае можно, не меняя направления

вращения коленчатого вала дизеля, изменить направление упора винта разворотом лопастей;

- устройством реверсивного механизма, позволяющего менять направление вращения коленчатого вала двигателя при прямой передаче крутящего момента на гребной винт. Этот способ получил распространение на установках с мощными малооборотными дизелями. Как правило, механизм реверсирования выполняется вместе с пусковым механизмом и называется реверсивно-пусковым устройством. Время реверсирования и пуска дизеля не должно превышать 15 с.

Скорость реверсирования двигателя является важной характеристикой маневренных качеств судна в целом. Реверсирование является тяжелым для двигателя режимом, так как на характер изменения нагрузок влияют одновременно два фактора: изменение динамических показателей рабочего процесса двигателя и изменение гидродинамических условий работы гребного винта.

Реверсирование судна на ходу с помощью устройства реверсивного механизма, позволяющего изменять направление вращения коленчатого вала двигателя при прямой передаче крутящего момента на гребной винт, включает следующие операции:

- выключение подачи топлива;
- реверсирование газораспределительных органов и топливоподачи из положения «вперёд» в положение «назад» ещё при вращающемся вале;
- торможение двигателя контр - воздухом;
- пуск двигателя в требуемом направлении и перевод на работу на топливе.

Нужно иметь ввиду, что торможение контр - воздухом является весьма напряжённым и к нему следует прибегать лишь в экстренных ситуациях.

Реверсирование начинается с остановки двигателя переводом топливных насосов на нулевую подачу (сектор газа насоса-регулятора в положении «стоп»). При этом вал двигателя продолжает вращаться под действием потока воды, вращающей гребной винт в прежнем направлении, и сил инерции вращающихся масс системы: - двигателя - валопровод. Вращение вала обеспечивается свободным выбегом двигателя, продолжительность которого зависит от тоннажа и скорости судна. При нормальной частоте вращения 90 об/мин время свободного выбега может достигать 60с. Для сокращения времени выбега применяют торможение вала двигателя подачей в цилиндры контр - воздуха через пусковые клапаны на линии сжатия. При этом принуждённый выбег уменьшается до 10с. Очевидно, что при сокращении выбега двигателя сокращается и выбег корпуса судна, под которым понимают путь, проходимый до полной остановки по инерции, и, следовательно, ускоряется процесс реверсирования. Чем выше давление контр - воздуха и чем продолжительней время его подачи в цилиндры (время открытия пускового клапана) тем больше тормозной момент. Чем выше частота вращения, тем тормозной эффект ниже, так как снижается время открытия пусковых клапанов, а значит подачу контр - воздуха в цилиндры надо начинать при снижении частоты вращения до малого хода.

Если в процессе реверсирования двигателя задана номинальная частота вращения на задний ход при полной скорости судна на передний ход, то отрицательный момент гребного винта достигает

четырёхкратного номинального значения, что может привести к критическим перегрузкам не только валопровода, но и самого двигателя. Нарушение требований надёжности при реверсировании может привести к отказу двигателя, что в условиях маневрирования грозит серьёзной аварией, поэтому к такому способу следует прибегать лишь в экстренных ситуациях.

Итак, в случае активного торможения судна, идущего передним ходом, выбег судна и время реверса в первую очередь зависят от времени перехода от мощности переднего хода к полной мощности заднего, которую можно оценить в долях от мощности переднего хода.

На первом этапе (до начала торможения) двигатель и ВФШ работают на передний ход. Длительность этого этапа определяется временем перекладки сектора газа насоса-регулятора дизеля в положение «стоп» и зависит от программы работы исполнительного механизма, обеспечивающего перекладку сектора газа системы управления режимами работы дизеля.

В этот период судно до начала торможения следует с постоянной скоростью установившегося движения v_0 . Путь, пройденный в этот период, составляет

$$L_{11} = v_0 t_n, \quad (3)$$

где: v_0 – начальная скорость торможения судна, t_n – продолжительность перекладки сектора газа из положения переднего хода в положение «стоп».

Второй период маневра начинается с момента прекращения подачи топлива в двигатель. Для быстрой остановки и последующего запуска двигателя в обратном направлении подаётся контр - воздух в соответствии с особенностями конструкции двигателя, что позволяет избежать его перегрузки. Как правило, для подачи контр - воздуха частота вращения дизеля должна составлять не более 50% номинальной, табл.1.

Таблица 1

Значение частоты вращения двигателя, рекомендуемой для пуска контр - воздуха

№ п/п	Тип двигателя	Частота вращения, об/мин	
		номинальная	реверсивная
1	6RD76	119	40
2	550VTBF1110	170	90
3	Fiat 758	125	35-40
4	MAN	115	40-45
5	STORK	116	35-42

Время, затрачиваемое на реверсирование, зависит от скорости судна перед реверсированием [6,7]. Так в установке с мощным двухтактным дизелем (мощность 12 тыс.л.с., частота вращения вала 110 об/мин.) суммарное время реверса от начала выполнения маневра до пуска дизеля на задний ход со скорости судна 12 узлов составляет 14с, а со скорости 16 узлов возрастает в 5 раз и достигает 70с. Такой рост связан с инерцией судна (водоизмещение 20340т). Из 70с около 60с уходит на ожидание момента, когда частота вращения вала дизеля снизится до 40 об/мин, при которой возможно торможение воздухом и затем осуществляется пуск дизеля на задний ход.

Движение судна во втором периоде можно рассматривать, как режим пассивного торможения,

который продолжается 1-4 мин и описывается уравнениями (1 и 2). В этот период уменьшается число оборотов винта до значения, соответствующего режиму «свободного вращения», когда винт под воздействием набегающего потока работает как турбина. Можно приближённо считать, что свободное вращение винта устанавливается при достижении равновесия между моментом сил трения в валопроводе и моментом, развиваемым винтом, как турбиной. Дальнейшее уменьшение числа оборотов винта при его «свободном вращении» происходит в соответствии с уменьшением скорости судна. В интервале времени с момента подачи топлива в двигатель до установления равенства моментов двигателя и винта упор винта можно приближённо принять равным нулю. В связи с этим движение судна, происходящее по инерции может быть представлено следующим уравнением:

$$(1 + \lambda_{11}) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} = -R(v), \quad (4)$$

где: m - масса судна; λ_{11} - коэффициент, учитывающий присоединённые массы воды.

Время торможения судна на втором этапе:

$$t_2 = \frac{(1 + \lambda_{11}) \cdot m}{R_0} \cdot v_0^2 \int_{v_0}^0 \frac{1}{v^2} \cdot dv, \quad (5)$$

где: R_0 - сопротивление движению при скорости v_0 установившегося движения в начальный момент времени $t = 0$.

После интегрирования имеем:

$$t_2 = \frac{(1 + \lambda_{11}) \cdot m}{R_0} \cdot v_0^2 \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_0} \right), \quad (6)$$

где: t_2 и v_2 - время и скорость в конце рассматриваемого периода.

Скорость v_2 , при которой прекращается вращение винта, можно получить из выражения [2]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{M_p^2}{(1 - \xi)^2 \cdot \rho \cdot k_m \cdot Q^3}}, \quad (7)$$

где: M_p - момент сопротивления вращению гребного вала; k_m - универсальный коэффициент момента при частоте вращения вала, равной нулю.

Для расчёта пути L_{12} на втором этапе торможения можно воспользоваться формулами:

$$L_{12} = \frac{(1 + \lambda_{11}) \cdot m \cdot v_0^2}{R_0} \cdot \ln \left[1 + \frac{R_0 \cdot t_2}{(1 + \lambda_{11}) \cdot m \cdot v_2} \right]; \quad (8)$$

$$R(v) = R_0 = (\varepsilon + \varepsilon_B) \cdot \zeta \cdot \frac{\rho v_0^2}{2} \cdot S_{см}, \quad (9)$$

где: ζ - безразмерный коэффициент полного сопротивления судна; ρ - плотность воды; $S_{см}$ - площадь смоченной поверхности судна, которую можно определить по приближённой формуле С.П.Мурыгина [1]:

$$S_{см} \cong L \cdot d \cdot \left(1,36 + 1,13 \cdot C_B \cdot \frac{B}{d} \right), \quad (10)$$

где: L , B , d - длина, ширина и текущая осадка судна; C_B - коэффициент общей полноты судна; ε , ε_B - коэффициенты, учитывающие влияние, соответственно, глубины моря и свободно вращающегося гребного винта, которые определяются по формулам:

$$\varepsilon = \left[1 + 0,33 \cdot \frac{d}{H_{гн}} + 1,1 \cdot \left(\frac{d}{H_{гн}} \right)^3 \right]; \quad (11)$$

$$\varepsilon_B = 100 \cdot \frac{Q_B}{K_H} \cdot \frac{A}{A_d}, \quad (12)$$

где: $\frac{d}{H_{гн}}$ - отношение осадки судна к глубине моря; K_H - сила сопротивления свободно вращающегося гребного винта; $\frac{A}{A_d}$ - дисковое отношение; Q_B - диаметр винта.

Рассмотрим третий этап торможения с момента реверса до момента полной остановки судна под действием тормозящей силы упора винта, работающего на задний ход. Движение судна на третьем этапе торможения происходит под действием тормозящей силы винта, развиваемой вращением его на задний ход до момента полной остановки судна. В этот период происходит уменьшение скорости хода в соответствии с уравнением (1). Однако этого уравнения недостаточно для определения искомых величин, так как в него входит неизвестная зависимость $\eta(t)$, поэтому для определения всех параметров торможения судна необходимо воспользоваться уравнением (2). При этом можно исключить из уравнения (1) зависимость от частоты вращения и тогда правая часть уравнения будет рассматриваться как функция скорости судна:

$$f(v) = -R(v) - P_e(v). \quad (13)$$

При этом тормозящая сила винта может быть рассчитана по формуле:

$$P_e = \frac{(1 - \tau) \cdot (1 - \xi)}{\lambda_p^2} \cdot k_p \cdot \rho \cdot Q^2 \cdot v^2, \quad (14)$$

где: τ - коэффициент засасывания; ξ - коэффициент попутного потока; k_p - коэффициент упора винта с учётом влияния корпуса; ρ - плотность воды; Q - диаметр винта.

Когда известна функция $P_e(v)$ наряду с известной $R(v)$, можно произвести интегрирование в соответствие с выражением для времени торможения на данном этапе:

$$t_3 = (m + \lambda_{11}) \cdot \int_{v_2}^0 \frac{dv}{f(v)}, \quad (15)$$

а также пути торможения в этот период:

$$L_{13} = (m + \lambda_{11}) \cdot \int_{v_2}^0 \frac{v dv}{f(v)}. \quad (16)$$

Третий период торможения заканчивается при $v = 0$. Тогда после интегрирования получим:

$$t_3 = \frac{m}{\varepsilon \cdot k \cdot b_T} \cdot \arctg \frac{v_2}{b_T}; \quad (17)$$

$$L_{13} = \frac{m}{2 \cdot \varepsilon \cdot k} \cdot \ln \left(1 + \frac{v_2^2}{b_T^2} \right), \quad (18)$$

где:

$$b_T = \sqrt{\frac{P_e}{\varepsilon \cdot k}}; \quad (19)$$

$$k = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot S_{см}}{2}. \quad (20)$$

Торможение судна с учётом влияния ветра, волнения моря и течения

Величину воздушного сопротивления судна, влияющего на его выбег, можно определить по формуле [6]:

$$R_{BT}(v_{BT}) = \xi \cdot \frac{\rho_{\text{вт}} \cdot v_{BT}^2}{2} \cdot S_{BT} \cdot \cos \varphi_{BT}, \quad (21)$$

где: ξ - коэффициент воздушного сопротивления, который определяется экспериментальным путём – продувкой сдвоенных моделей надводной части судов в аэродинамических трубах, либо (весьма редко) буксировкой погруженных до грузовой ватерлинии перевёрнутых моделей в опытовом бассейне. Скорости буксировки должны исключать возможность возникновения волнообразования на поверхности воды в бассейне.

Значения воздушного сопротивления представлены в табл.2; $\rho_{\text{вт}}$ - массовая плотность воздуха; v_{BT} - скорость ветра; φ_{BT} - курсовой угол судна по отношению к направлению действия ветра; S_{BT} - площадь проекции корпуса надстроек на плоскость мидель-шпангоута судна.

Таблица 2

Значения коэффициента воздушного сопротивления для различных судов

Тип судна	Значение
Танкеры	0,8 – 1,3
Грузовые и пассажирские суда	0,7 – 1, 2
Лайнеры	0,7 – 1,0
Быстроходные корабли	0,4 – 0,6

Кроме воздушного сопротивления в реальных условиях эксплуатации необходимо учитывать влияния волнения моря. Дополнительное сопротивление судна при волнении на произвольном курсовом угле можно определить аналогично дополнительному воздушному сопротивлению:

$$R_{BH} = R_{BH}^0 \cdot \cos \varphi_{BH}, \quad (22)$$

где:

$$R_{BH}^0 = \frac{1}{C_r} \cdot \left[1 + \frac{0,04}{\alpha_R^4 \cdot \left(\frac{10 \cdot \eta \cdot h_{3\%}}{2} \right)^2} \right]; \quad (23)$$

$$C_r = 113 \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\frac{L}{100} \right)^3 \cdot \left[\frac{\tau_y}{10} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot B}{L} \right)^2 \cdot 10 \cdot \frac{d}{L} \times \left[1 - 1,05 \left(1 - \frac{F_r}{0,29} \right)^2 \right]; \quad (24)$$

$$\alpha = \left[\frac{0,17}{R} \cdot \left(1 + \frac{10 \cdot 2\pi}{\tau_{\psi} \cdot \omega_L} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]; \quad (25)$$

R_{BH}^0 - сопротивления судна на встречном волнении; τ_{ψ} - период килевой качки; ρ - плотность воды; g - ускорение силы тяжести; L - длина судна; d - осадка судна; B - ширина судна; η - характеристика степени развитости волнения (0,7 – 1,5); $h_{3\%}$ - высота волны 3% обеспеченности; ω_L - частота волнения моря; φ_{BH} - курсовой угол движения судна по отношению к направлению распространения волнения.

Максимум дополнительного сопротивления от волнения моря наблюдается в области резонанса килевой и вертикальной качки, причём килевая качка оказывает на сопротивление большее влияние, чем вертикальная. Также из всех параметров судна наибольшее влияние на дополнительное сопротивление от морского волнения оказывает его длина. Максимальное влияние волнения наблюдается при отношении $\lambda / L = 0,8 - 1,2$, где: λ - длина волны; L - длина судна.

Дополнительное сопротивление, вызванное направленным течением можно ввести, как исходные

данные для периода торможения в виде скорости течения и курсового угла относительно курса судна:

$$R_T = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot V_T^2}{2} \cdot S_{\text{см}} \cdot \cos \varphi_T, \quad (26)$$

где: V_T - скорость течения; $S_{\text{см}}$ - площадь смоченной поверхности; ρ - плотность воды; φ_T - угол между курсом корабля и курсовым углом течения.

Тогда общее сопротивление движению судна при торможении будет:

$$R = R_0 + R_{BT} + R_{BH} + R_T. \quad (27)$$

Это значение необходимо подставить вместо R_0 в выражения (5), (6), (8) и (9).

С учётом дополнительного сопротивления движению судна от ветра, волнения моря и течения путь судна составит:

$$L_1 = L_{11} + L_{12} + L_{13} = V_0 \cdot t_n + V_2 \cdot t_2 \cdot V_3 \cdot t_3. \quad (28)$$

При работе винта на заданный ход в случае торможения реверсом гребного винта воздействие струи на перо руля резко снижается, судно плохо управляется и подвержено влиянию внешних возмущений в ходе маневра. При этом особенности маневра зависят от характеристик двигателя судна и должны учитываться при торможении для исключения аварийной ситуации.

Особенности торможения судна с другими типами двигателей и винтов

Тормозные характеристики судов с главным турбозубчатым агрегатом (ГТЗА) имеют определённые отличия от соответствующих характеристик судов с дизельным двигателем. Известно, что турбина является неререверсивной машиной. Для обеспечения заднего хода на судах с ГТЗА необходимо установить турбину заднего хода (ТЗХ), которая должна обеспечивать вращающий момент, равный 80% от номинального для переднего хода, при частоте вращения на задний ход равной 50%. Таким образом, расчётная мощность ТЗХ составляет примерно 40% номинальной мощности агрегата. Поэтому путь и время торможения турбоходов больше, чем у судов с дизельной установкой таких же размеров.

Реверс и остановка судна, оборудованного винтом регулируемого шага (ВРШ), осуществляется судоводителем с мостика без изменения вращения гребного винта, посредством разворота лопастей ВРШ. В зависимости от скорости поворота винты разделяют на группы: к первой относят ВРШ, у которых полный поворот лопастей из положения переднего хода к положению полного заднего хода осуществляется за время 30с; ко второй – ВРШ со временем перекадки лопастей более 30с. Суда с ВРШ второй группы обладают сниженными тормозными характеристиками.

Судно с ВРШ выполняет маневр торможения на 15 - 20% быстрее, чем аналогичное судно с винтом фиксированного шага (ВФШ). Наличие ВРШ позволяет судоводителю существенно облегчить выполнение эксплуатационных задач. Однако для судов с ВРШ характерна более ранняя потеря управляемости, в сравнении с судами, оборудованными ВФШ. В тоже время возможность точной установки лопастей ВРШ обеспечивает движителю необходимый упор и эффективность

управления судном в режиме реверса. Это достигается установкой лопастей ВРШ в положение, при котором при торможении сохраняется положительный поток, натекающий на руль. При этом эффективность руля меняется в зависимости от выбранного режима движения и удержания судна от смещения при торможении, что обеспечивает ему движение на прямом курсе в процессе реверса.

Чтобы осуществить режим торможения судна, с сохранением эффективности управления, нужно оценить два условия управляемости: необходимое и достаточное. Для выполнения необходимого условия - сохранения управляемости судна с ВРШ при реверсе - нужно, чтобы на руле сохранялась определённая скорость набегания потока. Достаточное условие управляемости характеризуется движением по прямолинейной траектории и обуславливается совокупностью сил, действующих на движущееся судно. Определить наиболее эффективный режим для управления ВРШ при реверсе способна система интеллектуальной поддержки (СИП) в системе управления движением судна [8-10].

Для любых ВФШ и ВРШ правого или левого вращения, могут сложиться условия, при которых судно утратит управляемость и отклонится от прямолинейного курса на правый или левый борт в зависимости от направления вращения, что необходимо учитывать при выполнении маневра.

В любом случае при наличии справочных данных о выбеге судна разной степени загрузки они могут быть скорректированы СИП с учётом текущей загрузки судна, волнения моря, течения, силы ветра и их направления при реализации торможения реверсом гребного винта.

Заключение

Рассмотрен режим реверсирования дизельного двигателя с помощью устройства, позволяющего

менять направление вращения коленчатого вала при прямой передаче крутящего момента на гребной винт. Этот способ получил распространение на установках с мощными малооборотными двигателями.

В случае активного торможения выбег судна зависит от времени перехода к полной мощности заднего хода. Приведённые уравнения системы судно – двигатель - гребной винт обеспечивают моделирование манёвра. Получены аналитические зависимости для определения скорости, времени и пути торможения судна.

Выполнен анализ торможения контр - воздухом. Показано, что к такому режиму следует прибегать лишь в экстренных ситуациях и при условии использования системы интеллектуальной поддержки (СИП) в процессе управления движением судна.

Представлены уравнения, учитывающие дополнительное сопротивление движению при осуществлении торможения судна, вызванное ветровым воздействием, волнением моря в зависимости от их направленности по отношению к курсовому углу движения судна.

Приведён перечень данных для ввода в систему управления движением с целью эффективного функционирования системы информационной поддержки в соответствии с текущими характеристиками судна и актуальными ветро - волновыми характеристиками.

Рассмотрены особенности торможения судна с главным турбозубчатым агрегатом (ГТЗА) и судна, оборудованного винтом регулируемого шага (ВРШ). Показано, что определить наиболее эффективный режим для управления ВРШ при реверсе способна система интеллектуальной поддержки (СИП) движения судна.

Литература

1. Управление судном и его техническая эксплуатация: [Учеб. для судоводителей/ Е.И. Жуков, М.Н. Либензон, М.Н. Письменный и др.]; Под общ. ред. А.И. Щетининой. - 3-е изд. - М.: Транспорт, 1983. - 655 с.
2. Справочник капитана дальнего плавания / [Л.Р. Аксютин и др.]; Под ред. Г.Г. Ермолаева. - М.: Транспорт, 1988. - 246 с.
3. Теория и устройство судов. Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В., Коннов А.В., Коваленко Б.П. Учебник. - Л.: Судостроение, 1991. - 416 с.
4. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля (ходкость и управляемость). Л.: Судпромгиз, 1960г. 688с.
5. Транспортно-экологическая безопасность морских операций в Российской Арктике: [Монография / С.В. Латухов, А.В. Кириченко, В.А. Никитин и др.] - СПб.: МАНЭБ, 2023. - 138 с.
6. Судоводителю о реверсе судов. Кацман Ф.М., Ершов А.А. Учеб. пособие. - М.: В/О Моринтехреклама, 1991. - 48 с.
7. Стариченков А.Л., Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Хабаров С.П. Структура программного обеспечения системы интеллектуальной поддержки принятия решения экипажем судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1 (60). С. 128-135.
8. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю. Алгоритмы функционирования судовых интегрированных систем управления в различных режимах // в сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2019. С. 97-104.
9. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Никитин Н.В. Оптимизация скорости и курса судна в штормовых условиях // Морские интеллектуальные технологии. 2024, № 1-1(63). С 209-215.
10. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 64-70.

References

1. Upravlenie sudnom i ego tekhnicheskaya ekspluatatsiya [Ship management and technical operation]: [Ucheb. dlya sudovoditelej/ E.I. Zhukov, M.N. Libenzon, M.N. Pis'mennyy i dr.]; Pod obshch. Red. A.I. Shchetininoj. - 3-e izd. - M.: Transport, 1983. - 655 p.
2. Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya [The handbook of the captain of a long voyage] / [L.R. Aksyutin i dr.]; Pod red. G.G. Ermolaeva. - M.: Transport, 1988. - 246 p.
3. Teoriya i ustrojstvo sudov [Theory and design of ships]. Kacman F.M., Dorogostajskij D.V., Konnov A.V., Kovalenko B.P. Uchebnik. - L.: Sudostroenie, 1991. - 416 p.
4. Vojtkunskij YA.I., Pershic R.YA., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablya (hodkost' i upravlyaemost') [Handbook of Ship Theory (seaworthiness and handling)]. L.: Sudpromgiz, 1960g. 688 p.
5. Transportno-ekologicheskaya bezopasnost' morskikh operacij v Rossijskoj Arktike [Transport and environmental safety of marine operations in the Russian Arctic]: [Monografiya / S.V. Latuhov, A.V. Kirichenko, V.A. Nikitin i dr.] - SPb.: MANEB, 2023. - 138 p.
6. Sudovoditel'yu o reverse sudov [To the skipper about the reverse of ships]. Kacman F.M., Ershov A.A. Ucheb. posobie. - M.: V/O Morintekhreklama, 1991. - 48 p.
7. Starichenkov A.L., Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Habarov S.P. Struktura programmnogo obespecheniya sistemy intellektual'noj podderzhki prinyatiya resheniya ekipazhem sudna [The structure of the software of the intelligent decision support system by the ship's crew] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2-1 (60). pp. 128-135.
8. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu. Algoritmy funkcionirovaniya sudovykh integrirovannykh sistem upravleniya v razlichnykh rezhimakh [Algorithms for the functioning of ship integrated control systems in various modes] // v sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem. Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Sankt-Peterburg, 2019. pp. 97-104.
9. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Nikitin N.V. Optimizatsiya skorosti i kursa sudna v shtormovykh usloviyakh [Optimization of the ship's speed and course in stormy conditions] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2024, № 1-1(63). pp. 209-215.
10. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Turusov S.N. Perspektivy sovershenstvovaniya sudovykh sistem upravleniya dvizheniem [Prospects for improving ship traffic management systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-3 (45). pp. 64-70.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

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

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каминский Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, assistant professor, PhD (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Скореходов Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 06.05.2024.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 629.576

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.032>

Формирование методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамических компоновок экранопланов на основе численного моделирования

Февральских А.В.¹ a.fevralskih@gmail.com, Орлов Ю.Ф.¹ tseu@nnov.ru, Панов А.Ю.¹ panov@nntu.ru,
Савинов В.Н.¹ smk@nntu.ru, Титов В.Г.¹ epa@nntu.ru.

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,

Аннотация. На сегодняшний день известно множество компьютерных программ, предназначенных для оптимального проектирования судов различных типов, которые в совокупности с CAD-пакетами (CAD – computer aided design, позволяют разработать компьютерную модель обводов и спецификации основных элементов судна для ее последующего использования в разработке конструкторской документации. В настоящей работе исследуются возможности применения современных компьютерных технологий в формировании методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана, удовлетворяющей требованиям продольной статической устойчивости. Приводятся результаты решения задачи оптимального проектирования компоновки крыла и оперения экраноплана на основе численного моделирования аэрогидродинамики. Предложен алгоритм проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана на основе численного моделирования.

Ключевые слова: экраноплан, аэродинамическая компоновка, численное моделирование

Для цитирования: Февральских А.В., Орлов Ю.Ф., Панов А.Ю., Савинов В.Н., Титов В.Г. Формирование методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамических компоновок экранопланов на основе численного моделирования. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 286—292. DOI 10.37220/MIT.2024.64.2.032:

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.032>

Formation of a methodology for computer-aided design of aerohydrodynamic layouts of ekranoplanes based on numerical modeling

Andrew V. Feuralskikh¹ a.fevralskih@gmail.com, Yuri F. Orlov¹ tseu@nnov.ru, Alexey Y. Panov¹ panov@nntu.ru,
Vladimir N. Savinov¹ smk@nntu.ru, Vladimir G. Titov¹ epa@nntu.ru

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

Abstract. Today, there are many computer programs designed for optimal design of ships of various types, which, together with CAD packages (CAD - computer aided design, allow you to develop a computer model of the contours and specifications of the main elements of the vessel for its subsequent use in the development of design documentation. In this paper, the possibilities of using modern computer technologies in the formation of a computer-aided design methodology for the aerohydrodynamic layout of an ekranoplan that meets the requirements of longitudinal static stability are investigated. The results of solving the problem of optimal design of the wing and tail assembly of an ekranoplan based on numerical modeling of aero-hydrodynamics are presented. An algorithm for designing the aerohydrodynamic layout of an ekranoplan based on numerical modeling is proposed.

Keywords: ekranoplan, aerodynamic ground-effect craft, aerodynamic characteristics, numerical simulation.

For citation: Andrew V. Feuralskikh, Yuri F. Orlov, Alexey Y. Panov, Vladimir N. Savinov, Vladimir G. Titov, Formation of a methodology for computer-aided design of aerohydrodynamic layouts of ekranoplanes based on numerical modeling. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 286—292. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.032

Введение

Развитие вычислительной техники и технологий автоматизированного проектирования привело к возможности их регулярного применения в различных отраслях промышленности в целом и в судостроении в частности. На сегодняшний день известно множество компьютерных программ, предназначенных для оптимального проектирования судов различных типов, которые в совокупности с

CAD-пакетами (CAD – computer aided design, позволяют разработать компьютерную модель обводов и спецификации основных элементов судна для ее последующего использования в разработке конструкторской документации. В основе этих программ, как правило, лежат полуэмпирические и вариационные математические модели зависимостей лишь основных размерений судна от различных компоновочных параметров и

характеристик эксплуатации, в то время как современные компьютерные технологии позволяют разрабатывать информационные модели судов с достаточной для современного проектирования детализацией: как в части спецификации изделия, так и в части физических процессов, сопровождающих основные этапы жизненного цикла судна. Последнее является особенно существенным для скоростных амфибийных судов – судов на воздушной подушке и экранопланов, компоновка которых в первую очередь зависит от аэрогидродинамики, а возможность удовлетворения требованиям технического задания – от достоверности определения аэрогидродинамических характеристик.

В настоящей работе исследуются возможности применения современных компьютерных технологий в формировании методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана, удовлетворяющей требованиям продольной статической устойчивости. Приводятся результаты решения задачи оптимального проектирования компоновки крыла и оперения экраноплана на основе численного моделирования аэрогидродинамики. Предложен алгоритм проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана на основе численного моделирования.

Математическое обеспечение методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана

Математические модели аэродинамики экраноплана изложены в ряде источников [1; 2; 3; 4] и могут быть классифицированы как аналитические и асимптотические. Модели первой группы подразумевают использование приближенных выражений на основе вихревой теории, модели второй группы основываются на асимптотических решении линеаризованных уравнений потенциального течения. Наряду с этими подходами в последние годы активно развиваются методы решения задач автоматизированного проектирования аэрогидродинамических компоновок экранопланов на основе численного решения уравнений Навье-Стокса (1) методов контрольных объемов [5; 6; 7; 8; 9].

Связанное течение двухкомпонентной несжимаемой среды (воды и воздуха) с учетом свободной границы раздела сред описывается системой уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nu_k \Delta \vec{V} - \frac{1}{\rho_k} \nabla p + \vec{f} \\ \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k + \nabla \alpha_k \vec{V} = 0 \\ \sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

В системе уравнений (1) $\vec{V}$ – вектор скорости, ν_k – кинематическая вязкость, ρ – плотность, p

– давление, $\vec{f}$ – сумма внешних (массовых) сил,

α_k – объемная доля вещества, обозначенного индексом k (воздуха или воды).

Для численного решения системы уравнений (1) методом контрольных объемов в случае обтекания экраноплана на режиме его крейсерского движения необходимо включить в математическую модель следующие граничные условия:

- на поверхности экраноплана S_{WIG} задается условие непротекания и торможения

$$\vec{V}(S_{WIG}) = 0;$$

- на наветренной поверхности расчетной области S_{IN} задается граничное скорости

$$\vec{V}(S_{WIG}) = -V_0, \text{ где } V_0 - \text{ скорость движения экраноплана (принимается принцип обращения движения);}$$

- на боковой и подветренной поверхности расчетной области задается условие свободного

$$\Delta p(S_{OUT}) = 0, \text{ где } \Delta p - \text{ величина перепада давления.}$$

Исходный уровень водной поверхности h_0 определяется в системе координат расчетной области OXYZ (ось OY направлена против вектора ускорения свободного падения) значение объемной доли воды

$$\alpha_w \text{ и воздуха } \alpha_{air} \quad (2).$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y < h_0 \\ \alpha_w = 1 \\ \alpha_{air} = 0 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} y > h_0 \\ \alpha_w = 0 \\ \alpha_{air} = 1 \end{array} \right. \quad (2)$$

Уровень свободной поверхности воды в процессе итеративного решения уравнений (1) методом контрольных объемов определяется с учетом инерции обращенного движения, сил гравитации и поверхностного натяжения.

Динамика, устойчивость и управляемость крейсерского движения экраноплана описывается системой уравнений (3), в общем случае записанная для трех поступательных и трех вращательных степеней свободы.

$$\left\{ \begin{array}{l} m \vec{a} = \vec{P} + \vec{D} + m \vec{g} \\ J \vec{\varepsilon} = \sum \vec{M} \end{array} \right. \quad (3)$$

В системе уравнений (3): m – масса судна, $\vec{a}$ – вектор ускорения, $\vec{P}$ – вектор силы тяги, $\vec{D}$ – вектор аэрогидродинамических сил (силы сопротивления, подъемной силы, силы скольжения), $\vec{g}$ – вектор ускорения свободного падения, J –

момент инерции, $\vec{\varepsilon}$ – вектор углового ускорения, $\vec{M}$ – момент силы.

Для исследования характеристик продольной статической устойчивости крейсерского движения экраноплана систему уравнений (3) удобно представить в форме (4) [10].

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g(n_x - \sin\theta) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_y - \cos\theta) \\ \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = \frac{M_z}{I_z} \\ \frac{dH}{dt} = V\sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

V – скорость; g – ускорение свободного падения; n_x и n_y – отнесенные к весу экраноплана суммы проекций сил на продольное и вертикальное направления; M_z – момент тангажа; I_z – момент инерции вращения по тангажу; H – высота движения над экраном (зазор между задней кромкой крыла и экраном); θ – угол наклона траектории; ϑ – угол тангажа.

В ходе анализа системы уравнений (4) в безразмерной форме Р.Д. Иродов, по аналогии с теорией прямолинейного установившегося движения самолета [11], предложил понятие координаты

аэродинамического фокуса по высоте X_H (5).

$$X_H = \frac{\partial m_z / \partial \bar{h}}{\partial c_y / \partial \bar{h}_{\alpha=\text{const}}} \quad (5)$$

Совместно с аэродинамическим фокусом по углу X_α , аэродинамический фокус по высоте используется для определения критериев продольной статической устойчивости (апериодической устойчивости) экраноплана (6).

$$\begin{cases} X_H - X_\alpha < 0 \\ X_G - X_\alpha < 0 \end{cases} \quad (6)$$

X_G – координата центра масс (в долях САХ) в сечении средней аэродинамической хорды, измеренная от носка крыла в направлении кормы судна.

В работе [12] для оценки устойчивости динамического и длиннопериодического движения экраноплана на основании эмпирических данных предложено соотношение, уточняющее критерии (7).

$$0.05 < X_\alpha - X_H < 0.15 \quad (7)$$

Таким образом, на основе уравнений (1), (3), (6) и (7) может быть сформулирована задача оптимального проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана с

учетом заданных требований по взлетной массе, скорости крейсерского полета и удовлетворения критериям продольной статической устойчивости, которая может быть решена с использованием CAE-систем (Ansys, Star CCM+, FlowVision), поддерживающих технологии численного моделирования аэрогидродинамики. Рассмотрим пример решения задачи оптимального проектирования аэродинамической компоновки экраноплана самолетной схемы в части удовлетворения критериям продольной статической устойчивости.

Решение задачи оптимального проектирования аэродинамической компоновки экраноплана самолетной схемы на основе численного моделирования

Для исследования возможностей разработанной методики решения задачи оптимального проектирования принята аэродинамическая компоновка крыла экраноплана самолетной схемы (рисунок 1) с профилем Clark-Y и

удлинением $\lambda = 2$ и стабилизатора с профилем

NACA 0012 и удлинением $\lambda = 8$. Безразмерное отстояние задней кромки крыла от экрана на крейсерском режиме, в соответствии с

предварительными расчетами, принимается $\bar{h} = 0.09$, значение крейсерской скорости 40 м/с, взлетной массы 3,5 т.



Рис. 1 – Аэродинамическая компоновка экраноплана самолетной схемы

В качестве параметров для оптимизации рассматриваются относительные величины плеча

установки оперения $\bar{L}$ и высоты установки

горизонтального оперения $\bar{H}$ в долях средней аэродинамической хорды крыла. Принимается следующий диапазон изменения значений

параметров: $\bar{L} \in [0.5; 2]$ и $\bar{H} \in [0; 2]$. В качестве целевой функции рассматривается величина

$\Delta \bar{X}_F = \bar{X}_{F_h} - \bar{X}_{F_\alpha}$, а в качестве ограничений, определяющих величину

искомого значения целевой функции – система неравенств (8) при положении центра масс

экраноплана $\bar{X}_{cg} = 0.4$ САХ.

$$\begin{aligned} \bar{X}_{F_\alpha} &\geq 0.5 \\ 0.05 &\leq \bar{X}_{F_h} - \bar{X}_{F_\alpha} \leq 0.15 \end{aligned} \quad (8)$$

$$0,35 \leq \bar{X}_{F_h} \leq 0,45$$

Для построения выборки расчетных случаев с использованием методики численного моделирования экранной аэродинамики используется метод латинского гиперкуба: результаты его применения для данной задачи показаны на рисунке 2.

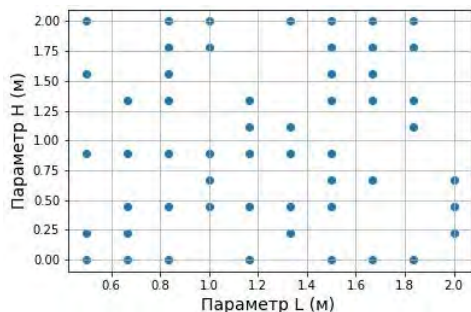
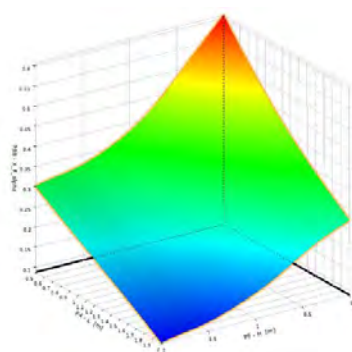
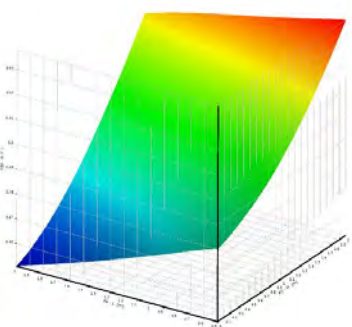


Рис. 2 – Выборка расчетных случаев

По результатам серии расчетов построены поверхности отклика для величин $\bar{X}_{F_\alpha}(\bar{L}, \bar{H})$ и $\bar{X}_{F_h}(\bar{L}, \bar{H})$, показанные на рисунке 3.



(а)



(б)

Рис. 3 – Поверхности отклика для значений

положений фокуса по углу $\bar{X}_{F_\alpha}$ (а) и фокуса по высоте $\bar{X}_{F_h}$ (б) как функции координат $\bar{L}, \bar{H}$

Результаты решения оптимизационной задачи по изложенной методике представлены на рисунке 4.

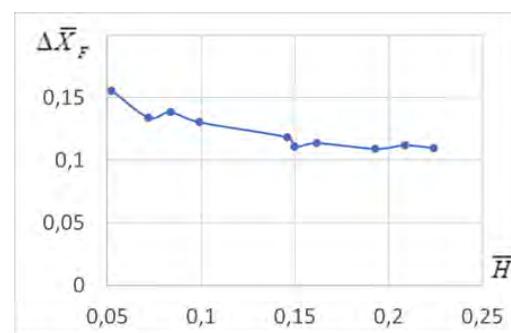
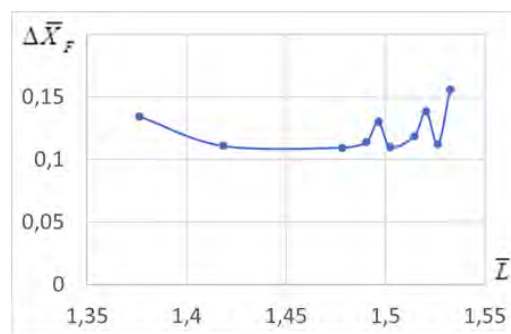


Рис. 4 – Зависимости величины межфокусного расстояния $\Delta \bar{X}_F$ от параметров $\bar{L}, \bar{H}$ по результатам решения оптимизационной задачи на основе численного моделирования

Результаты решения показывают, что с ростом высоты установки оперения $\bar{H}$ при достижении некоторого значения величина межфокусного расстояния практически не изменяется, а с увеличением плеча установки оперения $\bar{L}$ также после достижения некоторого значения наблюдается неустойчивость решения, которая может быть обусловлена как выбором алгоритма решения оптимизационной задачи, так и влиянием критерия устойчивости более высокого порядка. Таким образом, по результатам решения задачи оптимизации компоновки экраноплана самолетной схемы в первом приближении в качестве оптимальной пары значений искомых величин

представляется рациональным принять $\bar{L} = 1,48$ и $\bar{H} = 0,19$, поскольку они являются минимальными, то есть не приводят к увеличению относительных габаритов компоновки за счет совершенствования характеристик продольной статической устойчивости при прочих равных условиях.

Алгоритм оптимального проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана

На основе полученного опыта численного решения задачи оптимального проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана, удовлетворяющей критериям продольной статической устойчивости, сформирован алгоритм оптимального проектирования, представленный на рисунке 5

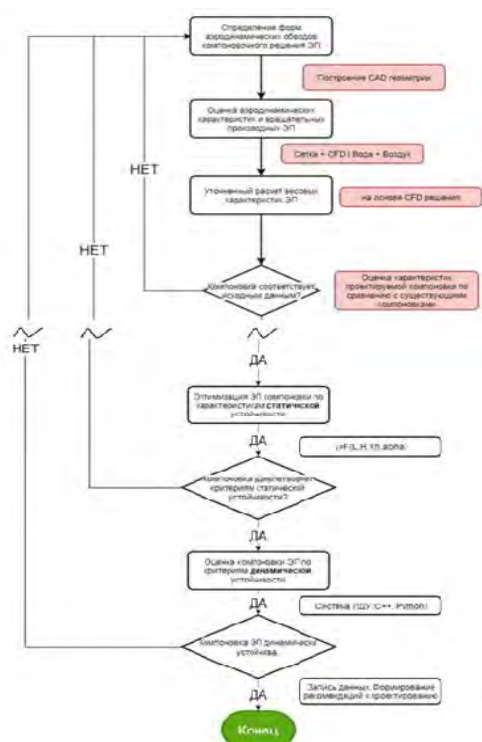


Рис. 5 – Алгоритм оптимального проектирования аэрогидродинамической компоновки экраноплана с учетом критериев продольной устойчивости крейсерского полета на основе численного моделирования

Заключение

Современный уровень развития САЕ-технологий и численных методов обуславливает возможность разработки методики автоматизированного проектирования аэрогидродинамических компоновок новых экранопланов, позволяющей удовлетворять ряду различных противоречивых требований, в частности, по одновременному обеспечению заданной величины взлетной массы и удовлетворению критериям продольной статической устойчивости крейсерского полета. С использованием разработанной методики автоматизированного проектирования определено оптимальное соотношение относительного плеча и высоты установки горизонтального оперения экраноплана самолетной схемы с Т-образным оперением и величины средней аэродинамической хорды основного несущего крыла при заданных значениях удлинения крыла и оперения. Эти результаты могут быть использованы в дальнейшем в разработке конструкторской документации легких пассажирских экранопланов данного типа.

Литература

1. Маскалик А.И., Нагапетян Р.А., Иваненко В.В., Бутицкий А.Г., Томилин В.В., Лукьянов В.И. Экранопланы: транспортные суда 21 века – СПб.: Судостроение, 2005 – 576 с.
2. Суржик, В.В. Структурно-параметрический синтез математических моделей экранопланов: монография / В.В. Суржик. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – 196 с.
3. Панченков, А.Н. Теория потенциала ускорений / А.Н. Панченков // Новосибирск: изд-во Наука, 1975. – 220 с.
4. Rozhddestvensky, K.V., "Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect" Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
5. Февральских, А.В. Автоматизированная оптимизация компоновки крыла и горизонтального оперения экраноплана по результатам численного моделирования аэродинамики / Е.М. Грамузов, В.И. Любимов, К.В. Смирнов, А.В. Соснов, А.В. Февральских // Морские интеллектуальные технологии – 2019. – № 1 (43) – т.3 – ISSN: 2073-7173 – с. 38-47.
6. Февральских, А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 175 с.
7. Программа для расчета вращательных производных коэффициентов аэродинамических сил и моментов экранопланов RotORDER 2.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668130, 10.11.2021 / Махнев М.С., Февральских А.В., Грамузов Е.М.
8. Махнев, М.С. Автоматизированное проектирование аэродинамической компоновки экраноплана самолетной схемы с Т-образным оперением, обеспечивающей устойчивость крейсерского хода: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – 147 с.
9. Вшивков, Ю.Ф. Методика определения и исследование пилотажных и летных характеристик экраноплана схемы «тандем» в продольном движении на этапе выбора параметров аэродинамической и объемно-массовой компоновки: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022. – 162 с.
10. Иродов, Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана / Р.Д. Иродов // Ученые записки ЦАГИ – 1970. – №4. – Т.1. – с.63 – 72
11. Остославский, И.В. Аэродинамика самолета / И.В. Остославский. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1957. – 560 с.
12. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.

References

1. Maskalik A.I., Nagapetyan R.A., Ivanenko V.V., Butlitsky A.G., Tomilin V.V., Lukyanov A.I. Ekranoplanes: transport vessels of the 21st century – St. Petersburg: Shipbuilding, 2005 – 576 p.
2. Surzhik, V.V. Structural-parametric synthesis of mathematical models of ekranoplanes: monograph / V.V. Surzhik. Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2012. – 196 p.
3. Panchenkov, A.N. Theory of acceleration potential / A.N. Panchenkov // Novosibirsk: Nauka Publishing House, 1975. – 220 p.
4. Rozhdestvensky, K.V., "Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect" Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
5. Fevral'skikh, A.V. Automated optimization of the wing layout and horizontal tail of an ekranoplane based on the results of numerical modeling of aerodynamics / E.M. Gramuzov, V.I. Lyubimov, K.V. Smirnov, A.V. Sosnov, A.V. Fevral'skikh // Marine intelligent technologies – 2019. – № 1 (43) – vol.3 – ISSN: 2073-7173 – pp. 38-47.
6. Fevral'skikh, A.V. Development of a methodology for designing the aerohydrodynamic layout of an amphibious hovercraft with aerodynamic unloading based on numerical modeling: dis. ... candidate of Technical Sciences. – Nizhny Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2017. – 175 p.
7. A program for calculating the rotational derivatives of the coefficients of aerodynamic forces and moments of RotODER 2.0 ekranoplanes. Certificate of state registration of the computer program No. 2021668130, 11/10/2021 / Makhnev M.S., February A.V., Gramuzov E.M.
8. Makhnev, M.S. Computer-aided design of the aerodynamic layout of the ekranoplane of an aircraft scheme with a T-shaped tail, ensuring the stability of cruising: dis. ... candidate of Technical Sciences. – Nizhny Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2021. – 147 p.
9. Vshivkov, Yu.F. Methodology for determining and studying the aerobatic and flight characteristics of the tandem ekranoplane in longitudinal motion at the stage of selecting parameters of aerodynamic and volumetric mass layouts: dis. ... candidate of Technical Sciences. Nizhny Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2022. – 162 p.
10. Irodov, R.D. Criteria for longitudinal stability of the ekranoplan / R.D. Irodov // Scientific notes of TsAGI – 1970. – No.4. – Vol.1. – pp.63-72
11. Ostoslavsky, I.V. Aerodynamics of an airplane / I.V. Ostoslavsky. – M.: State Publishing House of the Defense industry, 1957. – 560 p.
12. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.

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

Февральских Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: a.fevral'skih@gmail.com

Орлов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: tseu@nnov.ru

Панов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедр «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: panov@nntu.ru

Andrew V. Fevral'skikh, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department "Power Plants and Heat Engines", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: a.fevral'skih@gmail.com

Yuri F. Orlov, , Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department "Applied Mathematics", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: tseu@nnov.ru

Alexey Y. Panov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department "Theoretical and applied mechanics", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: panov@nntu.ru

Савинов Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Аэрогидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: smk@nntu.ru

Vladimir N. Savinov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department "Aerohydrodynamics, machine strength and material resistance", Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: smk@nntu.ru

Титов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: epa@nntu.ru

Vladimir G. Titov, , Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department «Electrical equipment, electric drive and automation», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: epa@nntu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.03.20243.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.04.2024.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 532.5.032:51-7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.033>

Глубоководные движения и зоны распределения давления

Коптев А.В.¹ Alex.Koptev@mail.ru

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

Аннотация. На основе трехмерных уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости произведено сопоставление гидростатического давления и давления вызываемого движением жидкости на глубине. Рассмотрены два варианта точных решений уравнений Навье – Стокса для случая неустановившегося движения в большом резервуаре, когда влиянием ограничивающих поверхностей можно пренебречь. Во всей области движения выявлены пять различных типов зон распределения давления. Для зоны первого типа давление значительно превышает гидростатическое. Для зоны второго типа имеет место превышение давления по сравнению с гидростатическим. Для зоны третьего типа давление близко к гидростатическому. Для зоны четвертого типа эффективное давление отличается от гидростатического в меньшую сторону за счет глубоководного движения. Для зоны пятого типа имеет место значительное уменьшение эффективного давления по сравнению с гидростатическим за счет глубоководного движения. Получены соотношения, позволяющие определять расположение каждой зоны в произвольный момент времени.

Ключевые слова: Глубоководный аппарат, движение, уравнения Навье – Стокса, несжимаемая жидкость, скорость, давление, точное решение, область.

Для цитирования: Коптев А.В. Глубоководные движения и зоны распределения давления, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 293—297. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.033

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.033>

Deep-sea movement and pressure distribution zones

Alexander V. Koptev¹ Alex.Koptev@mail.ru

¹Admiral Makarov state University of maritime and inland Shipping, Russian Federation,

Abstract. Based on 3D Navier – Stokes equations for a viscous incompressible fluid a comparison was made between hydrostatic pressure and pressure caused by fluid movement at depth. We consider two variants of exact solutions of Navier – Stokes equations for case of unsteady motion in a large tank when the influence of bounding surfaces can be neglected. Five different types of pressure distribution zones are identified throughout the entire movement area. For the first type zone the pressure significantly exceeds hydrostatic pressure. For the second type zone there is an excess of pressure compared to hydrostatic pressure. For the third type zone the pressure is close to hydrostatic. For the fourth type zone effective pressure differs from hydrostatic pressure to a lesser extent due to deep-sea movement. For the fifth type zone there is a significant decrease in effective pressure from hydrostatic due to deep-sea movement. Relationships have been obtained that make possible to determine the location of each zone at an arbitrary point in time.

Key words: Deep- sea vehicle, movement, Navier-Stokes equations, incompressible fluid, velocity, pressure, exact solution, zone.

For citation: Alexander V. Koptev, Deep-sea movement and pressure distribution zones, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 293—297. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.033

Введение

Исследования морских глубин не возможно без глубоководных аппаратов [1-2]. Однако, в реальной обстановке эксплуатация глубоководного аппарата связана с большими рисками. Это наглядно продемонстрировала авария, произошедшая с обитаемым глубоководным аппаратом “Титан” в Северной Атлантике в июне 2023 года. Предварительный анализ этой катастрофы указывает на то, что главными причинами аварии являются недостатки конструкции аппарата и человеческий фактор. Но эта версия не является окончательной. Существует несколько факторов,

которые могли привести к катастрофе. Один из главных факторов это большое гидростатическое давление, возникающее при движении на глубине. Многочисленные измерения говорят о том, что в результате погружения на каждый метр, давление в среднем возрастает на одну атмосферу.

Однако, существуют и другие факторы, которые могут вызывать повышение давления сверх нормативного. Такими факторами являются подводные течения на глубине и связанные с ними нелинейные эффекты. Движения водных потоков на глубине разнообразны по своему характеру. В частности, выделяются движения восходящие, нисходящие, плоскопараллельные, винтообразные.

Чем интенсивнее такие движения, тем большую составляющую они вносят в суммарное давление. Для определения возможности аппарата опускаться на определенную глубину и, при этом минимизировать риски при эксплуатации, необходим учет всех указанных факторов.

В настоящей работе предлагается исследование давления при движении на глубине, вычисленного на основе решения 3D уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Предпринята попытка аналитического определения зон распределения давления на глубине и в частности, определения зон повышенного давления, которые представляют наибольшую опасность при эксплуатации аппарата.

1. Метод исследования

Один из вариантов расчета давления на глубине основан на уравнениях Навье – Стокса, которые описывают движение жидких и газообразных сред при наличии вязкости [3-4]. Предлагается рассмотреть случай трехмерного неустановившегося движения несжимаемой среды, когда роль внешней силы играет сила тяжести. Если система координат выбрана так, что сила тяжести направлена вдоль оси OZ, то уравнения Навье – Стокса в безразмерных переменных имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Где u, v, w, p обозначают основные неизвестные, соответственно компоненты вектора скорости движения жидкости и давление; Re есть заданный положительный параметр, называемый числом Рейнольдса [3]; g – ускорение свободного падения.

Каждое из неизвестных u, v, w, p есть функция независимых переменных x, y, z, t .

На сегодняшний день общепринятого подхода к решению уравнений (1-4) нет. Главная сложность состоит в наличии нелинейных членов. Однако некоторые варианты решений были получены [5-10]. В частности, в работах [8-10] на основе интеграла уравнений (1-4) предложена процедура построения точных решений для случая движения жидкости в большом и глубоком резервуаре, когда влиянием ограничивающих поверхностей можно пренебречь. Решения этого типа можно применять для исследования движений в морских глубинах.

В настоящей работе предлагается исследование двух таких решений, каждое из которых соответствует возможным реальным движениям на глубине. Предлагаемые к рассмотрению решения определены следующими соотношениями.

Решение 1.

$$u = 2e^{\frac{24t}{Re}} \left(-A_0 e^{2x-4y+2z} + B_0 e^{-2x-2y+4z} \right),$$

$$v = e^{\frac{24t}{Re}} \left(-A_0 e^{2x-4y+2z} - 2C_0 e^{2x+2y-4z} \right), \quad (5)$$

$$w = e^{\frac{24t}{Re}} \left(B_0 e^{-2x-2y+4z} - C_0 e^{2x+2y-4z} \right),$$

$$p - p_0 = e^{\frac{48t}{Re}} \left(3A_0 C_0 e^{4x-2y-2z} - A_0 B_0 e^{-6y-6z} \right) - gz. \quad (6)$$

Решение 2.

$$u = \frac{3}{2} e^{\frac{189t}{Re}} \left(A_0 e^{\frac{3}{2}x+3y-6z} - B_0 e^{\frac{3}{2}x+6y-3z} \right),$$

$$v = \frac{3}{4} e^{\frac{189t}{Re}} \left(-A_0 e^{\frac{3}{2}x+3y-6z} + 6C_0 e^{\frac{3}{2}x-6y+3z} \right), \quad (7)$$

$$w = \frac{3}{4} e^{\frac{189t}{Re}} \left(B_0 e^{\frac{3}{2}x+6y-3z} + 12C_0 e^{\frac{3}{2}x-6y+3z} \right),$$

$$p - p_0 = \frac{9}{16} e^{\frac{189t}{Re}} \left(-A_0 B_0 e^{9y-9z} + 12A_0 C_0 e^{3x-3y-3z} \right) - gz. \quad (8)$$

В выражениях (5-8) p_0 есть аддитивная постоянная давления, а величины A_0, B_0, C_0 представляют ненулевые коэффициенты, определяемые начальными условиями.

Выражения (5-6) и (7-8) являются точными решениями уравнений Навье – Стокса, в чем можно убедиться их непосредственной подстановкой в уравнения (1-4). Таким образом, представляется благоприятная возможность аналитического исследования давления на глубине. Важно, что выражения (6) и (8) определяют суммарное давление, которое учитывает две составляющие давления. Одной из них является гидростатическая составляющая, которая определяется последними слагаемыми в правых частях выражений (6) и (8). Другой является составляющая давления, вызываемая движением жидкой среды на глубине. Эта составляющая определяется первыми слагаемыми в правых частях (6) и (8).

Предлагается исследовать выражения (6) и (8) при $z < 0$, и оценить соотношение между указанными составляющими в различных областях движения жидкости.

2. Результаты

Рассмотрим выражение (6), которое определяет давление в случае Решения 1. Представим (6) в более удобном варианте как

$$p - p_0 = 3A_0 C_0 e^{2\left(\frac{24t}{Re} + 2x - y - z\right)} - A_0 B_0 e^{6\left(\frac{8t}{Re} - y - z\right)} - gz. \quad (9)$$

Последнее слагаемое в правой части соответствует гидростатическому давлению и при $z < 0$ представляет положительную величину. Также принимаем во внимание следующую закономерность. При положительном показателе

экспонент неограниченно возрастает при увеличении показателя, тогда как при отрицательном показателе значение экспонента заведомо меньше единицы и возможно его приближение к нулю.

Рассмотрим случай

$$A_0 C_0 > 0, \quad A_0 B_0 < 0. \quad (10)$$

Этот случай имеет место, например, если $A_0 > 0$, $C_0 > 0$, $B_0 < 0$. Для этого случая все слагаемые правой части (9) положительны.

При этом, если выполнено

$$\begin{cases} 2x - y - z + \frac{24t}{Re} > 0, \\ -y - z + \frac{8t}{Re} > 0, \end{cases} \quad (11)$$

то показатели обоих экспонентов положительны и первые два члена в правой части (9) неограниченно возрастают с течением времени. В результате суммарное давление значительно возрастает по сравнению с гидростатическим давлением.

Представим краткое описание области движения жидкой среды в координатном пространстве XYZ, где указанная закономерность имеет место.

Каждое из неравенств системы (11) соответствует некоторому полупространству ограниченному плоскостями, соответственно $2x - y - z + \frac{24t}{Re} = 0$ и $-y - z + \frac{8t}{Re} = 0$. Причем, каждая из плоскостей перемещаются с течением времени в направлении своего вектора нормали, соответственно $\vec{N}_1(2, -1, -1)$ и $\vec{N}_2(0, -1, -1)$. Первая из указанных плоскостей перемещается в пространстве со скоростью $\frac{24}{Re|\vec{N}_1|}$, а вторая – со скоростью

$\frac{8}{Re|\vec{N}_2|}$. В результате пересечения этих двух плоскостей образуются четыре двугранных угла и все координатное пространство разбивается на четыре области. Область, внутри которой справедливы оба неравенства (11), есть область значительного превышения давления по сравнению с гидростатическим. Ее обозначим, как P_{++} . Для области, расположенной в противоположном двугранном угле, выполняются противоположные неравенства

$$\begin{cases} 2x - y - z + \frac{24t}{Re} < 0, \\ -y - z + \frac{8t}{Re} < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Для этого случая оба показателя экспонентов в правой части (9) отрицательны. Соответственно значения экспонентов меньше единицы и возможно приближение к нулю каждого из них. В результате правая часть (9) близка к величине $-gz$, то есть значение давления близко к гидростатическому. Область, внутри которой выполнены (12), обозначим как P_0 .

Кроме двух рассмотренных областей возникают и две другие. Для них одно из неравенств системы (11) выполнено, а другое заменяется на обратное. Для этих областей справедливо, или

$$\begin{cases} 2x - y - z + \frac{24t}{Re} < 0, \\ -y - z + \frac{8t}{Re} > 0, \end{cases} \quad (13)$$

или

$$\begin{cases} 2x - y - z + \frac{24t}{Re} > 0, \\ -y - z + \frac{8t}{Re} < 0. \end{cases} \quad (14)$$

Для рассмотренных случаев один из экспонентов правой части (9) возрастает, а другой сравнительно мал и может приближаться к нулю. Для этих областей также имеет место превышение давления по сравнению с гидростатическим, но оно менее значительное, чем для области, определяемой неравенствами (11). Области, определяемые неравенствами (13) и (14), логично назвать областями повышенного давления и обозначить, как P_+ .

Для Решения 2 аналогичные закономерности также имеют место. Рассмотрим выражение (8), и представим его в более удобном варианте как

$$p - p_0 = 12A_0C_0e^{3(x-y-z+\frac{63t}{2Re})} - \frac{9}{16}A_0B_0e^{9(y-z+\frac{21t}{2Re})} - gz. \quad (15)$$

Рассмотрим случай, когда выполнены оба неравенства (10). Тогда все слагаемые правой части (9) положительны. При этом, если

$$\begin{cases} x - y - z + \frac{63t}{2Re} > 0, \\ y - z + \frac{21t}{2Re} > 0, \end{cases} \quad (16)$$

то оба показателя экспонентов положительны и составляющая давления, вызываемая движением жидкости на глубине, усиливает гидростатическую составляющую. Таким образом, неравенства (16) определяют зону значительного превышения давления по сравнению с гидростатическим. Данная область находится внутри одного из двугранных углов, образованных плоскостями, соответственно $x - y - z + \frac{63t}{2Re} = 0$ и $y - z + \frac{21t}{2Re} = 0$. Обе эти плоскости перемещаются с течением времени в направлении своего вектора нормали, соответственно $\vec{N}_3(1, -1, -1)$ и $\vec{N}_4(0, 1, -1)$. Скорости перемещения плоскостей в пространстве равны соответственно $\frac{63}{2Re|\vec{N}_3|}$ и $\frac{21}{2Re|\vec{N}_4|}$. При увеличении значения числа Re значения скоростей уменьшаются, приближаясь к нулю. Область пространства, где выполнены оба неравенства (16) представляет зону P_{++} .

Если выполнены неравенства

$$\begin{cases} x - y - z + \frac{63t}{2Re} < 0, \\ y - z + \frac{21t}{2Re} < 0, \end{cases} \quad (17)$$

то имеем зону P_0 , в которой давление близко к гидростатическому.

Другие варианты также возможны. При выполнении неравенств

$$\begin{cases} x - y - z + \frac{63t}{2Re} > 0, \\ y - z + \frac{21t}{2Re} < 0, \end{cases} \quad (18)$$

или

$$\begin{cases} x - y - z + \frac{63t}{2Re} < 0, \\ y - z + \frac{21t}{2Re} > 0, \end{cases} \quad (19)$$

имеем зоны повышенного давления P_+ , в которых давление превышает гидростатическое, но превышение менее значительное, чем для зоны P_{++} .

Таким образом, в случае выполнимости неравенств (10) вся область движения жидкой среды условно может быть разбита на зоны трех различных типов. Первая это зона P_{++} – зона значительного превышения давления по сравнению с гидростатическим. Вторая это зона P_+ – зона давления повышенного по сравнению с гидростатическим. Третья это зона P_0 – зона, где давление близко к гидростатическому.

В случае, если неравенства (10) не выполнены, то возможно появление и двух зон другого типа, соответственно четвертого и пятого.

Рассмотрим, например, вариант, когда $A_0 < 0$, $B_0 < 0$, $C_0 > 0$. Для этого варианта неравенства (10) заменяются на обратные

$$A_0 C_0 < 0, \quad A_0 B_0 > 0. \quad (20)$$

Если выполнены (11) или (16), то первые слагаемые в правых частях, соответственно в (9) и в (15) отрицательны. Тогда как последнее слагаемое в правых частях по-прежнему положительно. В результате составляющая, вызываемая глубоководным движением, уменьшает действие гидростатического давления. Некоторые случаи, когда обтекание тела потоком жидкости ослабляет действие силы тяжести, рассмотрены в работах [11-

12]. Зону, где при выполнимости (20) такая закономерность имеет место, логично обозначить, как P_{--} .

Если выполнены (13) или (14) в случае Решения 1, и (16) или (17) в случае Решения 2, то лишь одно из слагаемых в правых частях (9) или (15) имеет экспоненциальный рост, оставаясь отрицательным за счет коэффициентов перед экспонентами. В результате составляющая, вызываемая глубоководным движением, ослабляет действие гидростатического давления. Но ослабление менее значительно, чем в предыдущем случае. Зоны этого типа логично обозначить, как P_- .

Приведем примеры расчетов для некоторых зон. Рассмотрим случай $Re=50$, что соответствует медленному движению в морской воде тела с поперечным размером около 1 метра. Обратимся к Решению 2, считая выполненными неравенства (20).

Рассмотрим момент времени $t=1$. Тогда, если аппарат находится в точке с координатами $x=1$, $y=1$, $z=2$, то выполнены оба неравенства (17), которые соответствуют зоне P_0 . Но в момент времени $t=5$ в точке с указанными координатами уже выполняются неравенства (16), которые соответствуют зоне P_{++} .

Таким образом, за сравнительно небольшой промежуток времени, $\Delta t = 4$, аппарат может оказаться в зоне значительного превышения давления по сравнению с гидростатическим. Давление может превысить нормативные значения, что сопряжено с дополнительными рисками.

3. Выводы

Вся область движения на глубине условно может быть разделена на зоны пяти различных типов в зависимости от соотношения между гидростатической составляющей давления и составляющей давления, вызываемой глубоководным движением.

Выделенные зоны не имеют статического характера, а перемещаются в пространстве с течением времени и их расположение во многом определяется значениями параметров A_0, B_0, C_0, Re . При увеличении значения числа Re скорости перемещения указанных зон уменьшаются, приближаясь к нулю.

Для зоны каждого типа получены определяющие соотношения, которые позволяют рассчитать ее расположение в любой момент времени.

На основании приведенного анализа следует очевидная рекомендация. При эксплуатации глубоководного аппарата следует выбирать такие режимы работы и такую траекторию движения, чтобы по возможности избежать нахождения аппарата в зонах P_{++} и P_+ , где давление увеличено по сравнению с гидростатическим.

Литература

1. Коман А.А. Современные глубоководные аппараты. – Изд-во ЦНИИТЭИС, 1967, 256 с.
2. Лисицин А.П. Колумбы океанских глубин. – Вестник РАН, 2003, Т.73, №9. – С. 842-852.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987, 833 с.
4. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Т.2. – М.: Наука, 1976, 532 с.
5. Polyanin A.D., Zhurov D.K. On order reduction of non-linear equations of mechanics and mathematical physics, new integrable equations and exact solutions. – Int. Jour. Non-linear mechanics, V.47, №5, 2012, P. 413-417.
6. Drazin P.G., Riley N. The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions. – Cambridge university press, 2006.

7. Ershkov S.V., Prosviryakov M.A., Artemov M.A., Leshchenko D.D. Non-stationary helical flows for incompressible couple stress fluid. – MDPI. Mathematics, 11(24), 2023, 4999.
8. Koptev A.V. Exact solutions of 3D Navier- Stokes equations. – Jour. Siberian federal university. Math. and Phys. – Issue 13(3), 2020. – P. 306-313.
9. Koptev A.V. Deep water movement. – Navier-Stokes equations and their applications. – Nova Science Publishers, New York, 2021. – P. 83-102.
10. Коптев А.В. Точные решения уравнений Навье-Стокса для движения в глубокой воде. – XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Сб-к тезисов докладов. – СПб, 2023, Т.2. – С.143-145.
11. Коптев А.В. Динамические реакции подводного трубопровода на морские течения. – Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова – Вып. 4(26), 2014. – С. 107-114.
12. Koptev A.V. D'Alembert paradox in near real conditions. – Jour. Siberian federal university. Math. and Phys. – Issue 10(2), 2017. – P.170-180.

References

1. Koman A.A. Sovremennye glubokovodnye apparaty [Modern deep-sea vehicles]. izd. STNIITEIS. 1967, 256 s.
2. Lisitsin A.P. Kolumby okeanskikh glubin [Columbus of the ocean depths]. Vestnik RAS. 2003. V.73, №9, P. 842-852.
3. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhydkosti i gasa [Mechanics of fluid and gas] .Moscow. Nauka. 1987, 833 s.
4. Sedov L.I. Mekhanika sploshnykh sred [Continuum mechanics]. V.2. Moscow. Nauka. 1976, 532 s.
5. Polyanin A.D., Zhurov D.K. On order reduction of non-linear equations of mechanics and mathematical physics, new integrable equations and exact solutions. Int. Jour. Non-linear mechanics. V.47. №5. 2012, P. 413-417.
6. Drazin P.G., Riley N. The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions. Cambridge university press. 2006.
7. Ershkov S.V., Prosviryakov M.A., Artemov M.A., Leshchenko D.D. Non-stationary helical flows for incompressible couple stress fluid. MDPI. Mathematics. 11(24). 2023, 4999.
8. Koptev A.V. Exact solutions of 3D Navier-Stokes equations. – Jour. Siberian federal university. Math. and Phys. Issue 13(3). 2020, P. 306-313.
9. Koptev A.V. Deep water movement. Navier-Stokes equations and their applications. Nova Science Publishers. New York. 2021, P.83-102.
10. Koptev A.V. Tochnye resheniya uravneniy Navie-Stoksa dlya dvizheniya v glubokoy vode [Exact solutions to the Navier-Stokes equations for motion in a deep water]. 13th All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics. Book of abstracts. Saint-Petersburg. 2023. V.2, P.143-145.
11. Koptev A.V. Dinamicheskie reaktsii podvodnogo truboprovoda na morskoe techeniya [Dynamic response of a underwater pipeline to sea currents]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. Vyp. 4(26). 2014, P. 107-114.
12. Koptev A.V. D'Alembert paradox in near real conditions. – Jour. Siberian federal university. Math. and Phys. Issue 10(2). 2017, P.170-180.

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

Коптев Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики, государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: Alex.Koptev@mail.ru

Alexander V. Koptev, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, professor of Mathematical Department, Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: Alex.Koptev@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.04.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 12.04.2023.

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.034>

Многокритериальный выбор системы технической эксплуатации средств обмена данными морского автономного надводного судна

Чернова А.И.¹ ruzhay_ann@mail.ru, Старжинская Н.В.¹ karbovets_n@mail.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассмотрено применение метода анализа иерархий в контексте выбора стратегии технической эксплуатации оборудования обмена данными морского автономного надводного судна (МАНС) в условиях внедрения концепции a-Navigation. Разработана иерархическая модель и описан алгоритм принятия управленческих решений по организации технического обслуживания систем связи, целью которого является достижение и поддержание заданного уровня эксплуатационной надежности. Построена иерархическая структура для оценки качества предложенных альтернатив технической эксплуатации оборудования с учетом количественных критериев. Обоснован выбор критериев оценки предпочтительности стратегий технической эксплуатации и установлена шкала приоритетов критериев. Составлены матрицы парных сравнений альтернатив стратегий технической эксплуатации относительно каждого предложенного критерия. Произведена количественная оценка предпочтительности альтернатив стратегий технической эксплуатации. Сделан вывод о применимости математической модели метода анализа иерархий для объективной организации технической эксплуатации оборудования МАНС.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, критерии, техническая эксплуатация, средства обмена данными, морское автономное надводное судно, a-Navigation стратегия, MathCAD.

Для цитирования: Чернова А.И., Старжинская Н.В. Многокритериальный выбор системы технического обслуживания средств обмена данными морского автономного надводного судна, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 298—304. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.034

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.034>

Multi-criteria selection of a maintenance system for data exchange means of Maritime Autonomous Surface Ship

Anna I. Chernova¹ ruzhay_ann@mail.ru, Natalya V. Starzhinskaya¹ karbovets_n@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the application of the hierarchy analysis method in the context of choosing a strategy for the technical operation of data exchange equipment for a maritime autonomous surface ship (MASS) in the context of the implementation of the a-Navigation concept. A hierarchical model has been developed and an algorithm for making management decisions on organizing the maintenance of communication systems, the purpose of which is to achieve and maintain a given level of operational reliability, is described. A hierarchical structure has been constructed to assess the quality of the proposed alternatives for the technical operation of equipment, taking into account quantitative criteria. The choice of criteria for assessing the preference of technical operation strategies is justified and a priority scale of criteria is established. Matrices of paired comparisons of alternative technical operation strategies were compiled with respect to each proposed criterion. A quantitative assessment of the preference of alternative technical operation strategies was made. A conclusion is made about the applicability of the mathematical model of the hierarchy analysis method for the objective organization of technical operation of MASS equipment.

Key words: hierarchy analysis method, criteria, technical operation, data exchange tools, maritime autonomous surface ship, a-Navigation strategy, MathCAD.

For citation: Anna I. Chernova, Natalya V. Starzhinskaya, Multi-criteria selection of a maintenance system for data exchange means of Maritime Autonomous Surface Ships, Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 298—304. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.034

Введение

Важным фактором внедрения концепции a-Navigation является наличие согласованной инфраструктуры обмена данными между МАНС и береговыми службами, в первую очередь Центром дистанционного управления (ЦДУ). В связи с этим к судовому оборудованию систем обмена данными предъявляют более высокие требования, которые в первую очередь относятся к обеспечению непрерывной радиосвязи в течение всего рейса.

Высокий уровень качества обмена данными позволяет обеспечить безопасность мореплавания в данном навигационном районе [1-3]. Для береговых пользователей (операторов ЦДУ) также требуются эффективные средства обмена данными с МАНС для обеспечения безопасности мореплавания и защиты окружающей среды, а также для предоставления оперативной информации. Эти требования в первую очередь относятся к составу и функциональным возможностям средств обмена данными МАНС, а также к уровню их эксплуатационной надежности на

весь период эксплуатации. Технологии радиосвязи, предпочтительные к использованию в интересах а-Navigation согласно IALA Maritime Radio Communications Plan, приведены на рис. 1 [1, 4].

Системы радиосвязи МАНС в морском районе А1 (до 30 миль от берега) должны применять современные цифровые стандарты связи с дальностью действия свыше 2 км. Беспроводная широкополосная передача данных, в том числе и по спутниковым каналам, должна использовать признанные международные стандарты беспроводной связи: LTE, WiMAX, GPRS, 5G и др.

Следует также отметить, что полноценная а-

Navigation возможна только при условии Интернет-доступа судна к береговым сервисам. Суды, имеющие глобальное мобильное подключение к Интернет, будут иметь заметное конкурентное преимущество. В будущем планируется применение на МАНС единого устройства связи с наземными службами, обеспечивающего автоматический выбор наилучших из возможных в текущих условиях каналов связи с берегом, что значительно повысит надежность и защищенность каналов обмена данными. Такой подход может быть реализован на базе технологий программно-определяемых радиосистем.

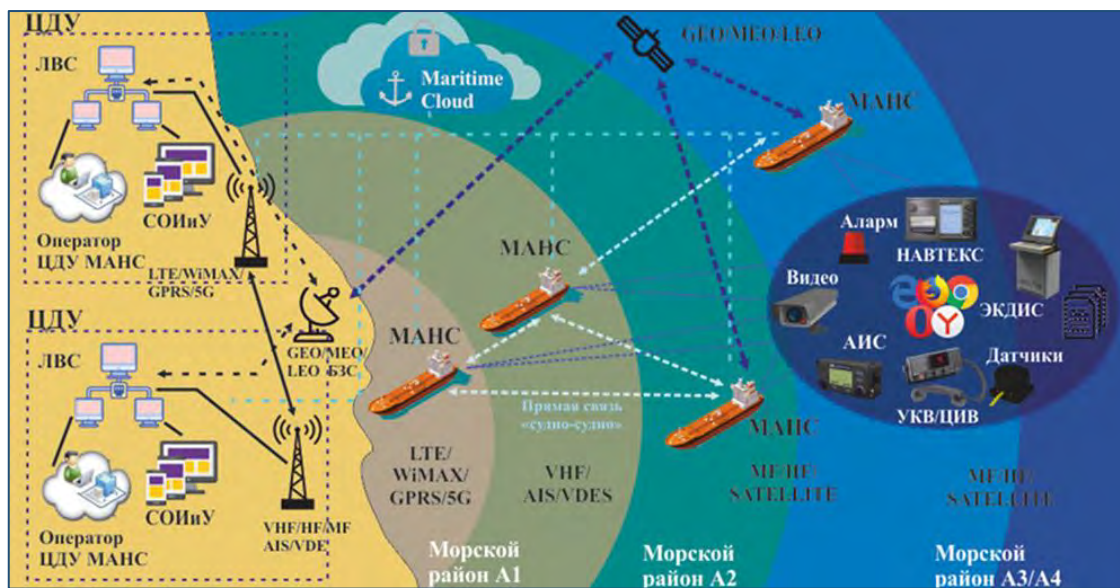


Рис. 1. Общая схема комбинированного обмена данными МАНС

Постановка задачи

Отказы оборудования систем обмена данными МАНС, также как ухудшение качества канала связи с береговыми службами, например, из-за недостаточной пропускной способности, могут привести к таким последствиям, как потеря местоположения МАНС, столкновение, посадка на мель и др. Также причинами этих аварийных ситуаций могут стать нарушение целостности передаваемых данных, сбой связи или полное ее отсутствие и др.

Как одна из мер повышения надежности путем обеспечения резервного канала связи между судном и ЦДУ для оборудования обмена данными МАНС предусмотрено структурное резервирование [1]. Так, при прерывании свыше 1500 мс или деградации канала с потерей свыше 30% пингов происходит переключение на резервный канал связи.

Несмотря на это, техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) систем обмена данными МАНС является неотъемлемым способом повышения их эксплуатационной надежности, а также безопасности судовождения. Регламентные мероприятия профилактического обслуживания оборудования, включая контрольно-измерительные и настроечно-регулирующие работы, а также полное или частичное обновление систем, помогают предотвратить потенциально возможные отказы и снижение эффективности функционирования

рассматриваемого оборудования, а также экономить средства за счет снижения риска возникновения дорогостоящих нештатных ситуаций, требующих проведения внеплановых аварийно-восстановительных работ [5].

При организации процесса ТО и Р в данном случае прежде всего, необходимо учитывать особенности работы МАНС, которое в отличие от обычных судов, не имеет постоянного экипажа на борту. Это значительно усложняет процесс обслуживания, так как доступ к судну может быть ограничен, а операции по обслуживанию систем обмена данными и другого оборудования могут требовать высокой квалификации специалистов. Одной из основных проблем организации технического обслуживания оборудования морского подвижного объекта является также необходимость проведения работ в открытом море или в удаленных районах, где в случае возникновения критической неисправности зачастую недоступна техническая поддержка сервисных специалистов или предприятия-изготовителя оборудования. Это обстоятельство требует наличия высококвалифицированных радиоспециалистов на борту судна или организации дистанционного превентивного ТО [5]. Это должно в первую очередь привести к пересмотру обязанностей береговых операторов ЦДУ, осуществляющих помощь МАНС в прибрежных районах плавания, с услуг по исправлению ситуаций на услуги по их

предупреждению, путем инновационного использования ресурсов и технологий.

Другой проблемой является необходимость постоянного мониторинга состояния систем обмена данными на судне и оперативного реагирования на возможные сбои или неисправности [5, 14]. Для этого необходимо использовать современные системы диагностики и мониторинга, а также обеспечить доступ к резервным компонентам и оборудованию для быстрой замены.

Выбор оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта систем обмена данными МАНС должен учитывать все эти аспекты, чтобы обеспечить надежную и эффективную работу в условиях отсутствия постоянного человеческого присутствия на борту. При этом возникает важная задача обоснования и выбора оптимальной по совокупности определенных критериев стратегии технической эксплуатации (ТЭ).

Математическая модель многокритериального выбора стратегии ТЭ средств обмена данными МАНС

Разработанный американским математиком Т. Саати метод анализа иерархий (МАИ) предназначен для решения слабоструктурированных и неструктурированных проблем. МАИ является мощным инструментом для принятия решений в ситуациях, где необходимо оценить и сравнить различные альтернативы по нескольким критериям [6, 7]. Метод заключается в том, что любая задача, состоящая в выборе из множества возможных альтернатив, может быть представлена в виде иерархической структуры. При этом конечная цель располагается в вершине иерархии и ее можно в свою очередь декомпозировать на более частные подцели. Благодаря этому сложные критерии на вершине иерархии переводятся в более простые критерии более низкого уровня, которые легко поддаются формализации и количественной или качественной оценке [8, 9].

Применение МАИ в задаче выбора оптимальной стратегии ТО и Р обосновано следующим:

- при выборе стратегии ТО и Р систем обмена данными МАНС необходимо учитывать различные аспекты, такие как квалификация специалистов, доступность оборудования, стоимость обслуживания, безопасность операций и др., при этом МАИ позволяет структурировать иерархию критериев и оценить их значимость для принятия обоснованных решений;

- в контексте ТО и Р на морском судне могут возникать неопределенные данные о состоянии систем обмена данными, доступности ресурсов и других факторах, что можно учесть в МАИ;

- в процессе применения МАИ можно задействовать экспертов из различных областей, имеющих опыт и знания в области ТО и Р, оценки которых помогут качественно определить важность критериев и оценить вклад каждой альтернативы в достижение цели.

Исходя из математической модели выбора оптимальной стратегии технической эксплуатации, мы сможем выделить вариант или набор вариантов из совокупности изучаемых стратегий ТО и Р по всем параметрам (критериям), по которым будем оценивать эффективность достижения цели, т.е.

обеспечение эксплуатационной надежности оборудования.

При решении поставленной задачи, в качестве критериев для принятия решений будем использовать оценки наиболее значимых параметров качества технической эксплуатации оборудования систем обмена данными МАНС[10]:

- коэффициент готовности, показывающий долю времени, в течение которого система работала без сбоев, от общего времени ее эксплуатации;

- вероятность выполнения заданных функций в произвольный момент времени эксплуатации;

- периодичность проведения мероприятий по его ТО;

- удельные затраты при проведении ТО и Р, приходящиеся на единицу времени эксплуатации системы;

- удельная прибыль при проведении ТО и Р, приходящиеся на единицу времени эксплуатации системы.

В качестве альтернатив повышения надежности оборудования примем следующие стратегии технической эксплуатации, согласно которым определяются периодичность и номенклатура мероприятий [10, 13]:

- стратегия ТЭ 1: в оборудовании возможно проведение лишь внеплановых аварийно-профилактических ремонтов после самостоятельного проявления отказа;

- стратегия ТЭ 2: в оборудовании возможно проведение регламентного предупредительного профилактического обслуживания и внеплановых аварийно-профилактических ремонтов, полностью восстанавливающих оборудование, независимо от вышедшего из строя блока;

- стратегия ТЭ 3: практически идентична стратегии ТЭ 2, но после проявления отказа производится замена только вышедшего из строя блока;

- стратегия ТЭ 4: в оборудовании возможно проведение внепланового предупредительного профилактического обслуживания и внеплановых аварийно-профилактических ремонтов части системы;

- стратегия ТЭ 5: полное восстановление оборудования только в заранее назначенный календарный срок, указанный в эксплуатационной документации, независимо от отказов;

- стратегия ТЭ 6: полное восстановление оборудования только в момент самостоятельного проявления возникшего отказа.

Выбор стратегии технической эксплуатации средств обмена данными по факторам (критериям), согласно МАИ, можно представить в виде иерархической структуры, представленной на рис.2.

Как было отмечено ранее, в вершине данной иерархической структуры расположена цель анализа, а именно требуемый уровень эксплуатационной надежности оборудования. Ниже на втором уровне приведены выбранные выше критерии решения оптимизационной задачи, в качестве которых приняты количественные показатели, оказывающие непосредственное влияние на надежность. Стратегии ТЭ средств обмена данными МАНС находятся на нижнем уровне иерархии в виде альтернативных сценариев (альтернатив) А1, А2, А3, А4, А5, А6.



Рис. 2. Иерархическая структура выбора стратегии технической эксплуатации МАИ

Количественные значения критериев для альтернатив организации процесса ТО и Р, определенные по методике, приведенной в [8], с

учетом статистических параметров надежности и стоимости эксплуатации судового радиооборудования [5], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественные значения критериев для выбранных альтернатив

Критерий \ Альтернатива	Коэффициент готовности	Вероятность выполнения функции	Средняя удельная прибыль	Средние удельные затраты	Периодичность проведения ТО
Стратегия ТЭ 1 A1	0,998	0,999	4,937	0,053	0
Стратегия ТЭ 2 A2	0,944	0,982	3,467	1,327	7000
Стратегия ТЭ 3 A3	0,998	0,997	4,937	0,053	7000
Стратегия ТЭ 4 A4	0,965	0,996	3,954	0,904	720
Стратегия ТЭ 5 A5	0,955	0,992	4,969	0,0056	720
Стратегия ТЭ 6 A6	0,992	0,979	4,658	0,0023	0

Ниже приведено решение задачи многокритериального выбора оптимальной стратегии ТЭ систем обмена данными МАНС с учетом заданных матриц парных сравнений значимости критериев и предпочтительности альтернатив, реализованная в среде математического моделирования Mathcad'15. Принятая шкала приоритетов в баллах от 1 до 9 представлена на рис.3 [9].

Степень важности	Определение
1	Одинаковая значимость
2	Слабое превосходство
3	Умеренное превосходство
4	Умеренный плюс
5	Сильное превосходство
6	Сильный плюс
7	Очень сильное превосходство
8	Очень, очень сильное превосходство
9	Абсолютное преобладание

Рис.3. Шкала приоритетов

При составлении матрицы попарных сравнений предпочтительности выбранных критериев K по балльной шкале оценивался их относительный вклад в достижение цели анализа на основе обобщения опыта эксплуатации судовых систем радиосвязи, а также с учетом требований международных документов (см. рис. 3). Поскольку критерии носят количественный характер и не используются лингвистические экспертные оценки, то этап анализа согласованности значений матрицы не выполнялся [11]. Программный блок вычисления

собственных значений одиночных матриц приведен на рис.4.

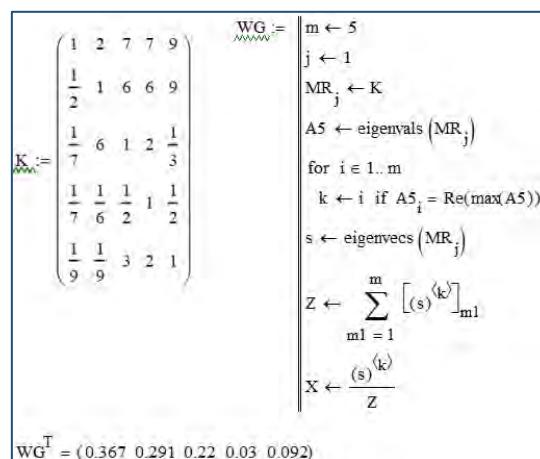


Рис. 4. Программный блок вычисления собственных значений одиночных матриц

В результате был получен орт собственного вектора WG соответствующей матрицы сравнения рассматриваемых критериев выбора альтернативных решений K . Из значений этого вектора можно сделать вывод, что максимальную значимость в достижении цели при выборе стратегии ТЭ имеет первый критерий «коэффициент готовности», что полностью соответствует требованиям [1, 12]. На втором месте по значимости стоит критерий «вероятность

выполнения функции».

Следующим этапом является вычисление матрицы локальных приоритетов альтернатив по каждому из критериев путем заполнения соответствующих матриц парных сравнений KA_1 – KA_5 , приведенных на рис.5. Заполнение всех матриц парных сравнений альтернатив стратегий ТЭ выполнено на основе сравнения приведенных в табл. 1 количественных значений выбранных критериев.

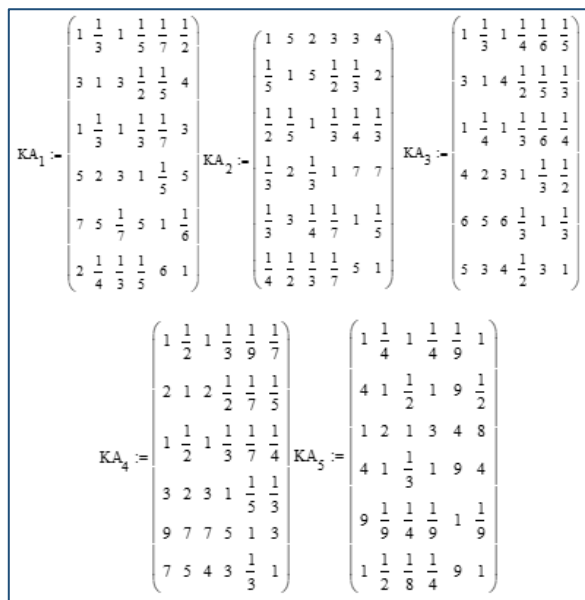


Рис. 5. Матрицы сравнений альтернатив по каждому критерию

Для определения вектора глобальных приоритетов альтернатив необходимо преобразовать каждую матрицу в собственный вектор, а затем нормализовать эти векторы и объединить в матрицу WF . Программный блок вычисления собственных значений множества матриц локальных приоритетов альтернатив и вектора глобальных приоритетов приведен на рис.6.

Полученный вектор глобальных приоритетов альтернатив относительно поставленной в иерархической структуре цели Ar своим максимальным значением определяет

оптимальную стратегию ТЭ рассматриваемых средств обмена данными МАНС.

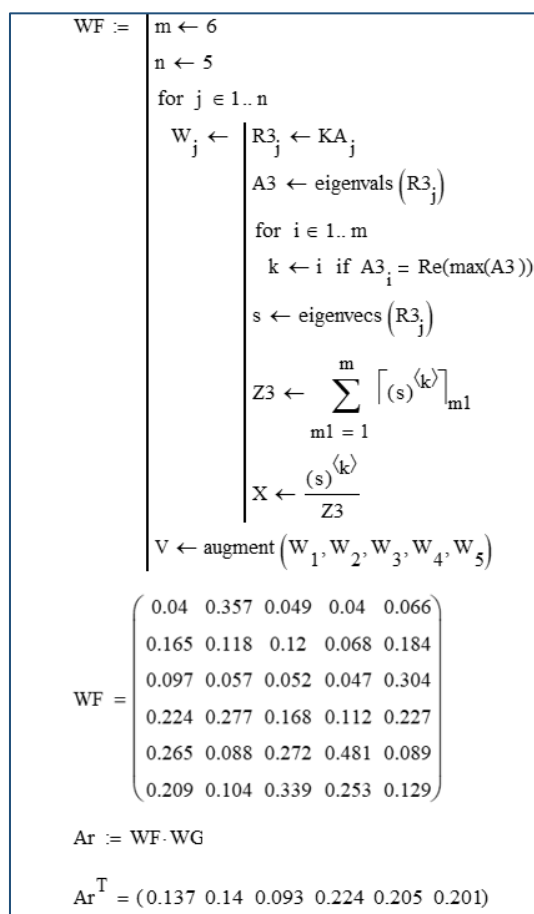


Рис. 6. Программный блок определения собственных значений множества матриц локальных приоритетов альтернатив

Полученная в результате проведенного моделирования с помощью МАИ иерархическая структура, содержащая рассчитанные значения глобальных и локальных приоритетов совокупности альтернатив стратегий ТЭ, приведена на рис.7.

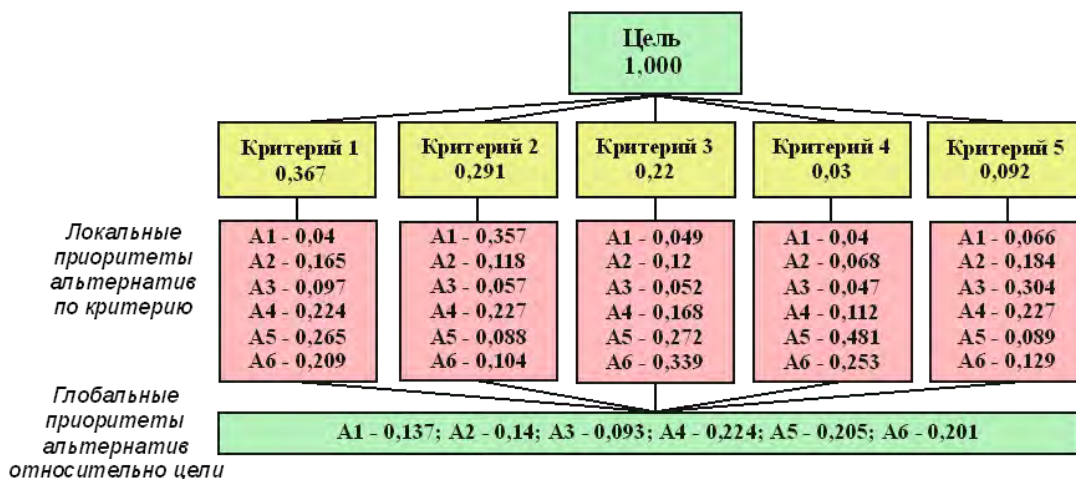


Рис. 7. Решение задачи выбора стратегии технической эксплуатации с помощью МАИ

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для оборудования систем обмена данными МАНС стратегия ТЭ 4 является оптимальной с точки зрения выбранных критериев, поскольку включает в себя проведение внеплановых предупредительных профилактик и аварийно-профилактических ремонтов части системы. Мероприятия по предупредительной профилактике выполняются при достижении наработкой на отказ заданного значения. Если отказ оборудования происходит раньше этого момента времени, то выполняется внеплановый аварийно-профилактический ремонт отказавшего блока. При этом проведенный ремонт отказавшего блока не увеличивает наработку системы. Эти мероприятия повторяются до достижения заданной наработки, после чего проводится внеплановая предупредительная профилактика, независимо от количества прошедшего времени с последнего аварийно-профилактического ремонта и общего числа проведенных ремонтов за рабочий период. После окончания предупредительной профилактики система восстанавливает частично или полностью израсходованный ресурс и процесс эксплуатации повторяется заново.

Заключение

Метод анализа иерархий помогает структурировать данные, учитывать различные факторы и выявлять приоритеты, что способствует принятию обоснованных и объективных решений при организации технической эксплуатации сложных систем. При этом МАИ обеспечивает прозрачность процесса выбора стратегии технической эксплуатации оборудования радиосвязи и помогает легче объяснить принципы принятия решений заинтересованным сторонам.

Применение МАИ также позволяет эффективно определить наиболее важные параметры и факторы, воздействующие на принятие решения. Это уменьшает время, затраченное на анализ и выбор оптимальной стратегии, а также позволяет эффективнее распределить ресурсы на выполнение выбранной стратегии.

Таким образом, использование метода анализа иерархий при выборе стратегии технической эксплуатации оборудования радиосвязи на автономном морском судне не только способствует принятию обоснованных решений, но и приносит значительную пользу лицу, принимающему эти решения, в виде экономии времени, ресурсов, улучшения результатов и снижения рисков.

Литература

1. НД № 2–030101–037. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). – СПб., Российский морской регистр судоходства.
2. Епихин А.И., Модина М.А. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 77-82.
3. Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Жумаев Ж. Ж. Обеспечение помехозащищенности передачи данных по радиолокационным каналам связи // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 4(105). – С. 221-228.
4. IALA Maritime Radio Communications Plan. – Париж, МАМС. – 2017.
5. Бойко, А.И. Эксплуатационная надежность судовых радиоэлектронных средств связи в условиях дальнего плавания: специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бойко Анна Ивановна. – Новороссийск, 2006. – 150 с.
6. Чернова А.И., Старжинская Н.В. Моделирование влияния достоверности контроля технического состояния серверного комплекса морского автономного надводного судна на его эксплуатационную надежность // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 342-349.
7. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М.: ЛКИ, 2008. – 360 с.
8. Цибилова Т. Ю. Применение метода анализа иерархий в оценке качества процессов управления / Т. Ю. Цибилова, А. А. Карпунин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 200.
9. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: пер. с англ. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
10. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высш. школа, 1992. – 231 с.
11. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив. Учебное пособие. // СПб.: Лань, 2009. 272 с.
12. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74). (Консолидированный текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. – 992 с.
13. Астреин В.В., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Астреина Л.Б., Филатов В.И. Анализ информации аис и моделей для построения пространственно-временных алгоритмов прогнозирования движения судов в море. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1-1 (63). С. 159-170.
14. Кондратьев И.С., Студеникин Д.Е. Структура БСМ модели движения судна. Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 1 (106). С. 23-27.

References

1. ND № 2-030101-037. Polozhenija po klassifikacii morskikh avtonomnyh i distancionno upravljaemyh nadvodnyh sudov (MANS) [Provisions for the Classification of Maritime Autonomous and Remotely Operated Surface Ships (MASS)], SPb., Rossijskij morskij registr sudohodstva.

2. Epikhin, A. I., Modina M. A. Problemy vnedreniya bezekipaznykh sudov na osnove statisticheskikh issledovaniy avariynykh situatsiy i poter' sudov [Problems of implementation of unmanned ships based on statistical studies of accidents and losses of ships]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021, No 3-1(53), S. 77-82.
3. Dancevich, I. M., Lyutikova M. N., Zhumaev Zh. Zh. Obespechenie pomekhozashchishchennosti peredachi dannykh po radiolokatsionnym kanalami svyazi [Ensuring noise immunity of data transmission via radar communication channels] Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2022. № 4(105). S. 221-228.
4. IALA Maritime Radio Communications Plan, Paris, IALA, 2017.
5. Bojko, A. I. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' sudovykh radioelektronnykh sredstv svyazi v usloviyakh dal'nego plavaniya [Operational reliability of ship radio-electronic communications equipment in long-distance navigation conditions]: special'nost' 05.12.13 "Sistemy, seti i ustrojstva telekommunikatsiy": dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Novorossiysk, 2006. 150 s.
6. Chernova, A.I., Starzhinskaya N.V. Modelirovanie vliyaniya dostovernosti kontrolja tehnikeskogo sostojaniya servernogo kompleksa morskogo avtonomnogo nadvodnogo sudna na ego jekspluatatsionnuju nadezhnost' [Modeling the influence of the reliability of technical condition mass server complex monitoring on its operational reliability]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2023, № 2-1(60), S. 342-349.
7. Saati T. L. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Making decisions. Hierarchy Analysis Method]. Moskva: LKI, 2008. 360 s.
8. Cibizova, T. YU. Primenenie metoda analiza ierarhij v ocenke kachestva processov upravleniya Moskva: Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. № 2-1. S. 200.
9. Saati T.L. Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnykh svyazyah: Analiticheskie seti: per. s angl [Decision making with dependencies and feedbacks: Analytical networks: trans. from English]. Moskva: Izdatel'stvo LKI, 2008. 360 s.
10. Barzilovich E. YU. Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh system [Maintenance Models for Complex Systems]. Moskva: Vyssh. shkola, 1992. 231 s.
11. Mikoni S.V. Mnogokriterial'nyy vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ. Uchebnoe posobie [Multicriteria choice on a finite set of alternatives. Tutorial.]. Sankt-Peterburg: Lan', 2009. 272 s.
12. Mezhdunarodnaya konvenciya po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74). (Konsolidirovannyj tekst, izmenennyj Protokolom 1988 goda k nej, s popravkami) [International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS-74). (Consolidated text as modified by the 1988 Protocol thereto, as amended)]. SPb.: ZAO «CNIIMF», 2010, 992 s.
13. Astrein V.V., Kondrat'yev S.I., Boran-Keshish'yan A.L., Astreina L.B., Filatov V.I. Analiz informatsionnykh sistem i modeley dlya postroyeniya prostranstvenno-vremennykh algoritmov prognozirovaniya dvizheniya sudov v more [Analysis of information systems and models for constructing spatio-temporal algorithms for predicting the movement of ships at sea]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2024. № 1-1 (63). S. 159-170.
14. Kondrat'yev I.S., Studenikin D.Ye. Struktura BSM modeli dvizheniya sudna [Structure of the BSM model of ship motion]. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2023. № 1 (106). S. 23-27.

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

Чернова Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Anna I. Chernova, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Старжинская Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Natalya V. Starzhinskaya, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.04.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 07.05.2024

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.842.6; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.035>**О моделировании развития и тушения пожара при паромной перевозке железнодорожных составов**Таранцев А.А.¹ t__54@mail.ru, Маринов М.Л.¹ marinlomsky@gmail.com, Коновалов И.Н.¹ info@iptran.ru¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН

Аннотация. В статье рассмотрена проблема моделирования пожаров железнодорожных составов, перевозимых паромом. Показано, что такие пожары могут принимать каскадный характер, т.е. возгорание одного вагона может привести к возгораниям соседних вагонов, в результате чего масштаб пожара значительно возрастает. Показано, что такие пожары на пароме в плавании могут привести к трагическим последствиям, в том числе и к масштабному экологическому инциденту ввиду низкой огнестойкости корпуса судна и невозможности оказания оперативной помощи извне. Для описания процессов горения и тушения вагонов применён математический аппарат цепей Маркова с непрерывным временем. Получены аналитические выражения для характерных сценариев пожара и приведены соответствующие расчётные оценки вероятностей состояния парома. Сделаны выводы о целесообразности дальнейших исследований в части моделирования пожароопасных ситуаций с разными типами перевозимых вагонов и совершенствования соответствующих нормативных документов.

Ключевые слова: железнодорожные составы, паромы, пожар, тушение, моделирование, цепи Маркова, вероятности состояний, каскадное развитие.

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

Для цитирования: Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании развития и тушения пожара при паромной перевозке железнодорожных составов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 305—311. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.035

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.64.2.035>**On modeling the development and extinguishing of fire during ferry transportation of railway trains**Alexander A. Tarantsev¹ t__54@mail.ru, Marin L. Marinov¹ marinlomsky@gmail.com,Ivan N. Konovalov¹ simulator.ipt@outlook.com¹Solomenko Institute of Transport Problems of RAS

Abstract. The article considers the problem of modeling fires of railway trains transported by ferries. It is shown that such fires can take on a cascading character, i.e. the ignition of one car can lead to fires of neighboring cars, as a result of which the scale of the fire increases significantly. It is shown that such fires on ferries during navigation can lead to tragic consequences, including a large-scale environmental incident due to the low fire resistance of the vessel's hull and the inability to provide operational assistance from the outside. To describe the processes of burning and extinguishing wagons, the mathematical apparatus of Markov chains with continuous time is used. Fire Analytical expressions for typical fire scenarios are obtained and corresponding estimates of the probabilities of the ferry condition are given. Conclusions are drawn about the expediency of further research in terms of modeling fire-hazardous situations with different types of transported wagons and improving the relevant regulatory documents.

Key words: railway trains, ferries, fire, extinguishing, modeling, Markov chains, state probabilities, cascade development.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-00602-24-0 for 2024 and for the planned period of 2025 and 2026 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 18 January 2024 № 075-03-2024-666)

For citation: Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov, Ivan N. Konovalov. On modeling the development and extinguishing of fire during ferry transportation of railway trains. Marine intellectual technologies. 2024. № 2 part 1, P. 305—311. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.035

Введение

Актуальность настоящей статьи вызвана следующими обстоятельствами. Во-первых, интенсивным развитием железнодорожного транспорта [1] и ростом объёма перевозок [2],

например, в 2023 г. ОАО «РЖД» перевезло 1,2 млрд пассажиров [3]. Во-вторых, географическими особенностями нашей страны, изобилующей большим количеством водных преград, обуславливающих необходимость паромных перевозок [4]. При этом как у нас, так и за рубежом

многие паромы предназначены для перевозки железнодорожных составов – рис.1 (для справки: один из первых создателей таких паромов – шотландский инженер Thomas Bouch, 1822-1880).



а



б

Рис.1. Паромы для перевозки железнодорожных составов (а – один из первых проектов, б – современный паром проекта А.1400)

В-третьих, железнодорожные составы и грузовые, и пассажирские обладают высокой пожароопасностью, грузовые – ввиду перевозки пожароопасных грузов (рис.2-а), пассажирские – ввиду отделки и интерьера вагонов (рис.2-б). Вопросам пожаровзрывоопасности железнодорожного транспорта была посвящена отдельная НИР, результатом которой стал нормативный документ [5]. Показано, что наибольшую опасность может представлять особый вид локомотивов – газотурбовозы и газотепловозы, пожары которых чреваты риском взрывов.



а



б

Рис.2. Пожары на железнодорожном транспорте (а – горение цистерны с ЛВЖ, б – горение пассажирского вагона)

В четвёртых, пожары на паромов, перевозящих транспортные средства, представляют особую опасность [6, 7], статистика по таким пожарам приведена в предыдущей статье [8]. Опасность пожаров на паромов обусловлена как пониженной огнестойкостью металлических конструкций корпуса,

так невозможностью оказания оперативной помощи извне при нахождении парома вдали от портов (рис.3) и большой пожарной нагрузкой подвижного состава. Такие пожары могут принимать каскадный характер и приводить также к масштабным экологическим инцидентам.



Рис.3. Пожар парома в процессе плавания



Рис.4. Тушение пожара на пароме в порту

Понимание важности данной проблемы обусловило создание нормативных документов в части обеспечения пожарной безопасности судов [9, 10] при их плавании. При пожаре парома в море или другом водоёме, то его тушение осуществляется пожарной командой (вахтой) из членов экипажа с использованием заборной воды. Если же вагоны находятся на закрытой палубе, то включаются автоматические установки пожаротушения (АУП) [16], как правило, дренчерные.

Что касается наиболее «лёгкого» случая – пожара парома в порту, то он может быть потушен силами объектовой пожарной части [11, 17] (рис.4). В обоих случаях тактика тушения предусматривает предотвращение скопления поды на палубах во избежание смещения центровки и опрокидывания судна.

И хотя по имеющейся информации на начало XXI века пожаров на железнодорожных паромов пока не зафиксировано, нет гарантии, что они не возникнут. В этой связи, с учётом большой опасности таких пожаров, которые могут носить каскадный характер [12, 13] (т.е. пожар с одного вагона может перебраться на другой, с другого на третий и т.д.), представляется целесообразным построить математические модели пожаров паромов с подвижным составом и провести оценку вероятностей событий, связанных с развитием пожара и его тушением.

Моделирование каскадного развития пожароопасных ситуаций на пароме

Развитие и тушение пожара на пароме, перевозящем железнодорожные вагоны, и носящим

каскадный характер может быть описано с использованием математического аппарата цепей Маркова [14, 15]. Поскольку в предыдущей статье [8] теоретическом аспекту этого аппарата было уделено значительное внимание, в данной статье будут рассмотрены математические модели цепей и их применение для оценки вероятностей состояний $\{S\}$ паром при нескольких сценариях каскадного развития пожара находящихся на пароме железнодорожных вагонов.

Сценарий №1 наиболее простой и характеризуется двумя состояниями ($n=2$): S_1 – нормальная ситуация и S_2 – горение вагона. Сценарий представлен графом на рис.5-а, где l_{12} – вес перехода, соответствующий вероятности или интенсивности возгорания вагона; l_{21} – вес перехода, отражающий оперативное тушение вагона и проведение аварийно-восстановительных работ (АВР). При этом сценарии каскадного развития пожара нет, т.к. он потушен оперативно.

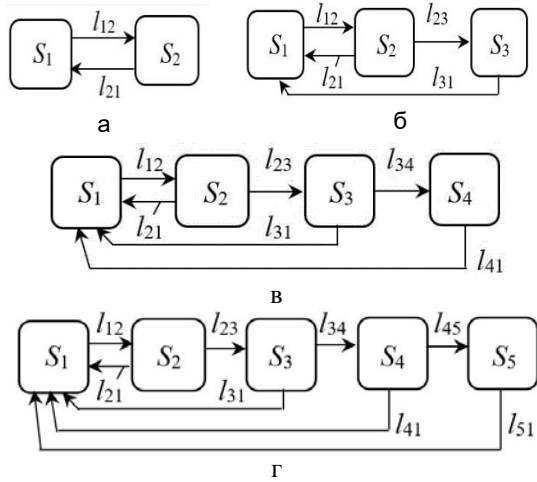


Рис. 5. Граф переходов для марковских цепей, описывающих каскадное развитие горения вагонов и их тушения на пароме для нескольких сценариев

Сценарий №2 характеризуется тремя ($n=3$) состояниями S_1 , S_2 и S_3 (рис.5-б). Состояния S_1 , S_2 и переходы l_{12} , l_{21} как в сценарии №1, состояние S_3 – горение соседнего вагона, l_{23} – переход пожара на соседний вагон, l_{31} – тушение обоих вагонов и проведение АВР.

Сценарий №3 характеризуется четырьмя ($n=4$) состояниями S_1 , S_2 , S_3 и S_4 (рис.5-в). Состояния S_1 – S_3 и переходы l_{12} , l_{21} , l_{23} , l_{31} как в сценарии №2, состояние S_4 – горение еще одного вагона, l_{34} – переход пожара на другой соседний вагон, l_{41} – тушение всех трёх вагонов и проведение АВР.

Сценарий №4 характеризуется пятью ($n=5$) состояниями S_1 – S_5 (рис.5-г). Состояния S_1 – S_4 и переходы l_{12} , l_{21} , l_{23} , l_{31} , l_{34} , l_{41} как в сценарии №3, состояние S_5 – горение еще одного вагона, l_{45} – переход пожара на четвёртый вагон, l_{51} – тушение всех четырёх вагонов и проведение АВР.

Сценарии №2–4 уже соответствуют каскадному развитию пожара. Очевидно, подобным образом можно описать и сценарии с большим числом горящих вагонов, когда $n>5$.

Для оценки вероятностей $\{P\}$ состояний $\{S\}$ паром с вагонами можно использовать цепи с

дискретным и непрерывным временем [14, 15]. В первом случае весами $\{l_{ij}\}$ являются вероятности $\{p_{ij}\}$ переходов, во втором случае – интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$ переходов. В данной статье будем использовать подход А.Н. Колмогорова [8, 12, 13], оперирующий интенсивностями $\{\lambda_{ij}\}$, имеющими физический смысл как количество событий в единицу времени. Такой подход позволяет перейти к системам линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка, которые применительно к выше рассмотренным сценариям №1–4 каскадного развития пожара вагонов имеют соответственно вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{21}P_2, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{34})P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{34}P_3 - \lambda_{41}P_4. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4 + \lambda_{51}P_5, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{34})P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{34}P_3 - (\lambda_{41} + \lambda_{45})P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4 - \lambda_{51}P_5 \end{cases} \quad (4)$$

(t – время). Или в общем случае для $n>2$:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \sum_{i=1}^n \lambda_{i1}P_i, \\ \frac{dP_i}{dt} = \lambda_{i-1,i}P_{i-1} - (\lambda_{i,i-1} + \lambda_{i,i+1})P_i, i \in [2, n-1], \\ \frac{dP_n}{dt} = \lambda_{n-1,n}P_{n-1} - \lambda_{n1}P_n. \end{cases} \quad (5)$$

При этом соблюдается равенство:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, \quad (6)$$

а любое из уравнений в системах (1)–(5) может быть заменено на равенство (6).

Решение систем уравнений (1)–(5) при начальных условиях $P_1(0) = 1$, $P_i(0) = 0$, $i \in [2, n]$ позволяет найти динамику вероятностей состояний $P_i(t)$. Например, из системы (1) получаем:

$$\begin{cases} P_1(t) = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21})t} + \frac{\lambda_{21}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}}, \\ P_2(t) = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} - \frac{\lambda_{21}}{\lambda_{12} + \lambda_{21}} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{21})t}. \end{cases} \quad (7)$$

из системы (2):

$$\begin{cases} P_1(t) = C_1 e^{-\Lambda_1 t} + C_2 e^{-\Lambda_2 t} + P_1^c, \\ P_2(t) = C_3 e^{-\Lambda_1 t} + C_4 e^{-\Lambda_2 t} + \frac{\lambda_{12}}{\Lambda_2} P_1^c, \\ P_3(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t), \end{cases} \quad (8)$$

где $\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \begin{bmatrix} \Lambda_1 + \Lambda_2(1 - P_1^c) \\ \Lambda_1(P_1^c - 2) \end{bmatrix}$; $\Lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{31}$;

$$\Lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{23}; \Lambda_2 \neq \Lambda_1; P_1^c = \left[1 + \frac{\lambda_{12}(\lambda_{23} + \lambda_{31})}{\lambda_{31}(\lambda_{21} + \lambda_{23})} \right]^{-1};$$

$$C_3 = \frac{\lambda_{12}C_1}{\Lambda_2 - \Lambda_1}; C_4 = \lambda_{12} \left[t - \frac{1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \right] - \frac{P_1^c}{\Lambda_2}.$$

Аналогично могут быть получены выражения и для других сценариев. Здесь P_1^c – вероятность того, что на пароме не будет пожара.

На практике интерес представляет не столько динамика вероятностей $\{P\}$, сколько их

установившиеся значения, которые можно найти из систем уравнений (1)-(5), обнулив их левые части и получив тем самым системы линейных алгебраических уравнений. Решив их, получаем для вышерассмотренных сценариев явные выражения:

$$\begin{cases} P_1^{-1} = 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}}, \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} P_1; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_1^{-1} = 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \left(1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31}} \right), \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} P_1, \\ P_3 = \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} P_1; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_1^{-1} = 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \left[1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41}} \right) \right], \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} P_1, \\ P_3 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} P_1, \\ P_4 = \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} P_1; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_1^{-1} = 1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \left\{ 1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} \left[1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41} + \lambda_{45}} \left(1 + \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51}} \right) \right] \right\}, \\ P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} P_1, \\ P_3 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} P_1, \\ P_4 = \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41} + \lambda_{45}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} P_1, \\ P_5 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51}} \cdot \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41} + \lambda_{45}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} P_1. \end{cases} \quad (12)$$

Выражения (9)-(12) можно представить в общем виде:

$$\begin{cases} P_1^{-1} = 1 + \sum_{i=2}^{n-1} \prod_{j=2}^i \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,1} + \lambda_{j,j+1}} + \frac{\lambda_{n-1,n}}{\lambda_{n,1}} \prod_{j=2}^{n-1} \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,1} + \lambda_{j,j+1}}, \\ P_i = P_1 \prod_{j=2}^i \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,1} + \lambda_{j,j+1}}, i \in [2, n-1], \\ P_n = P_1 \frac{\lambda_{n-1,n}}{\lambda_{n,1}} \prod_{j=2}^{n-1} \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,1} + \lambda_{j,j+1}}. \end{cases} \quad (13)$$

Примеры оценки вероятностей состояний паромы

1. Пусть необходимо оценить вероятности состояния паромы, перевозящего железнодорожные вагоны. Пусть известно, что частота (интенсивность) возникновения горения вагона на пароме $\lambda_{12}=0,001$, интенсивность тушения вагона и проведения АВР $\lambda_{21}=0,05$. Указанные интенсивности заданы условно, их размерность обратна времени.

Паром может пребывать в двух ($n=2$) состояниях, соответствующих сценарию №1: S_1 – паром работает в штатном режиме, S_2 – горит один вагон (рис.5-а). Требуется оценить вероятности этих состояний – соответственно $P_1(t)$ и $P_2(t)$.

Решить задачу можно с использованием выражений (7).

$$P_1(t) = \frac{0,001}{0,001+0,05} e^{-(0,001+0,05)t} + \frac{0,05}{0,001+0,05} = 0,0196e^{-0,051t} + 0,9804.$$

$$P_2(t) = 0,0196 - 0,09804e^{-0,051t}.$$

Нетрудно убедиться, что равенство (6) соблюдается.

Очевидно, что в течение достаточно продолжительного периода эксплуатации паромы установившиеся вероятности состояний будут равны $P_1^c = 0,9804$, $P_2^c = 0,0196$. Это означает, что средняя вероятность того, что на пароме не будет пожара 98%. Эту же оценку можно получить из 1-го уравнения системы (9).

2. Пусть необходимо оценить вероятности состояния паромы, перевозящего два железнодорожных состава, расположенных рядом. Пусть, как и ранее, известно: $\lambda_{12}=0,001$ и $\lambda_{21}=0,05$. В случае каскадного развития пожара интенсивность его перехода на соседний вагон $\lambda_{23}=0,1$, а интенсивность тушения обоих вагонов и проведения АВР $\lambda_{31}=0,02$.

Очевидно, паром может пребывать в трёх ($n=3$) состояниях, соответствующих сценарию №2: S_1 – паром работает в штатном режиме, S_2 – горит один вагон и S_3 – горят два вагона (рис.5-б). Требуется оценить вероятности этих состояний – соответственно $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$.

Решить эту задачу можно с использованием выражений (8). Сначала найдём: $\Lambda_1 = 0,001 + 0,02 = 0,021$; $\Lambda_2 = 0,05 + 0,10 = 0,15$; $\Lambda_2 \neq \Lambda_1$;

$$P_1^c = \left[1 + \frac{0,001(0,10+0,02)}{0,02(0,05+0,10)} \right]^{-1} \approx 0,9615;$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{0,15-0,021} \begin{bmatrix} 0,021 + 0,15(1-0,9615) \\ 0,021(0,9615-2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,20756 \\ -0,16905 \end{bmatrix};$$

$$P_2^c = \frac{0,001}{0,15} 0,9615 = 0,00641;$$

$$C_3 = \frac{0,001 \cdot 0,207056}{0,15-0,021} = 1,605 \cdot 10^{-3};$$

$$C_4 = 0,001 \left[0,20756 \left(t - \frac{1}{0,129} \right) - \frac{0,9615}{0,15} \right] = 10^{-3} (0,20756 \cdot t - 6,41).$$

Тогда:

$$P_1(t) = 0,20756e^{-0,021t} - 0,16905e^{-0,15t} + 0,9615,$$

$$P_2(t) = 1,605 \cdot 10^{-3}e^{-0,021t} + (2,0756 \cdot 10^{-4}t - 0,00641)e^{-0,15t} + 0,0064,$$

$$P_3(t) = -0,20917e^{-0,021t} - [(0,20756 \cdot t - 6,41)10^{-3} - 0,16905]e^{-0,15t} + 0,0311.$$

$$P_2^c = 0,0311.$$

Нетрудно убедиться, что равенство (6) соблюдается.

Из полученных результатов следует, что в течение продолжительного периода эксплуатации паромы вероятность того, что на нём не будет пожара - более 96%. Эту же оценку можно получить из 1-го уравнения системы (10).

3. Пусть необходимо оценить вероятности состояния паромы, перевозящего три железнодорожных состава, расположенных рядом. Пусть, как и ранее, известно: $\lambda_{12}=0,001$, $\lambda_{21}=0,05$, $\lambda_{23}=0,1$ и $\lambda_{31}=0,02$. В случае каскадного развития пожара интенсивность его перехода на ещё один соседний вагон $\lambda_{34}=0,1$, а интенсивность тушения трёх вагонов и проведения АВР $\lambda_{41}=0,015$.

Такой паром может пребывать в четырёх ($n=4$) состояниях, соответствующих сценарию №3: S_1 – паром работает в штатном режиме, S_2 – горит один вагон, S_3 – горят два вагона и S_4 – горят три вагона (рис.5-в). Требуется оценить вероятности этих состояний – соответственно P_1 , P_2 , P_3 и P_4 .

Поскольку получить аналитические выражения динамики таких состояний сложно и учитывая важность оценки их установившихся значений, воспользуемся системой уравнений (11)

$$P_1 = \left\{ 1 + \frac{0,001}{0,05+0,1} \left[1 + \frac{0,1}{0,02+0,1} \left(1 + \frac{0,1}{0,015} \right) \right] \right\}^{-1} = 0,953053;$$

$$P_2 = \frac{0,001}{0,05+0,1} 0,95353 = 0,006354;$$

$$P_3 = \frac{0,001}{0,05+0,1} \cdot \frac{0,1}{0,02+0,1} 0,95353 = 0,005295;$$

$$P_4 = \frac{0,001}{0,05+0,1} \cdot \frac{0,1}{0,02+0,1} \cdot \frac{0,1}{0,015} 0,95353 = 0,03530.$$

Нетрудно убедиться, что равенство (6) соблюдается.

Подобным образом можно оценить вероятности $P_1 + P_5$ по выражениям (12) для сценария №4 и для большего числа n по выражениям (13).

Результаты, полученные в примерах, обладают непротиворечивостью, в частности, показано, что чем больше вагонов может быть охвачены пожаром, тем меньше статистическая вероятность того, что паром будет функционировать в штатном режиме. И чем скорее будут ликвидированы пожары вагонов, тем выше будет указанная вероятность.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы моделирования пожаробезопасности паромов, перевозящих железнодорожные составы. В качестве аппарата использованы марковские цепи с непрерывным временем, которые позволяют

описать каскадные процессы развития пожаров железнодорожных составов.

Приведены примеры оценок вероятностей состояний паромов от его функционирования в штатном режиме до горения и тушения нескольких вагонов.

В дальнейшем планируется: а) рассмотреть особенности тушения пожаров при наличии железнодорожных цистерн с ЛВЖ, ГЖ и СУГ, ликвидацию последствий взрывов и проведение АБР; б) рассмотреть особенности обеспечения безопасности пассажиров при горении пассажирских вагонов на пароме; в) сформулировать соответствующие предложения для внесения дополнений в нормативные документы ФПС МЧС России, ОАО «РЖД» и ФГП ВО ЖДТ России в части тушения пожаров на паромов.

Литература

1. Бахтина Т.В. Общий курс железных дорог: учеб. пособие. – Волгоград: ВТЖТ – филиал ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – 224 с.
2. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2023 г. Изд-во Союза операторов ЖД транспорта. СОЖТ, 2024. – 30 с.
3. В 2023 году на сети ОАО «РЖД» перевезено 1,2 млрд пассажиров // Официальный сайт ОАО «РЖД» URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=290218&ysclid=luo29bboxa237661363> (дата обращения: 12.04.2024).
4. Митрошин С.Г. Организация паромно-транспортных логистических систем (на примере Волжско-Камского бассейна). Дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. по спец.05.22.19. Ниж. Новгород: ВГАВТ, 2010. – 159 с.
5. Рекомендации по тушению пожаров на железнодорожном транспорте – СПб.: ФГБУН Институт проблем транспорта им.Н.С.Соломенко РАН, 2018 г. – 148 с.
6. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Куватов В.И. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромов // Морские интеллектуальные технологии, №1, т.1, 2022, с.12-17.
7. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей // Морские интеллектуальные технологии, №4, т.1, 2022, с.279-283.
8. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромов и плавучих автостоянках с использованием сетей Маркова // Морские интеллектуальные технологии, №1, часть.1, 2024, с.270-275.
9. Правила пожарной безопасности на морских судах. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10.
10. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. СОЛАС 74. Протокол 1988 г. (с изменениями).
11. Приказ МЧС России от 16.10.2017 г. № 444 "Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ.
12. Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Поташев Д.А. О каскадном развитии взрывопожарной ситуации на автостоянке // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2023. – № 4. – С.16-25.
13. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Матвеев А.В., Шкитронов М.Е. О моделировании каскадного развития ЧС при пожарах в подземных автостоянках // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – №3 (67). – С. 131-140.
14. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 271 с.
15. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972, 552 с.
16. СП 485.131600.2020. СППЗ. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
17. Турсенев С.А., Решетов А.П., Ключ В.В., Косенко Д.В. Пожарная тактика: справочник специалиста. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. – 140 с.

References

1. Bahtina T.V. Obshhij kurs zheleznih dorog: ucheb. posobie. – Volgograd: VTZhT – filial FGBOU VO RGUPS, 2021. – 224 s. [Bakhtina T.V. General course of railways: textbook. allowance. – Volgograd: VTZhT – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RGUPS, 2021. – 224 p.]
2. Obzor raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta za 12 mesjacev 2023 g. Izd-vo Sojuza operatorov ZhD transporta. SOZhT, 2024. – 30 s. [Review of the work of freight railway transport for 12 months of 2023. Publishing house of the Union of Railway Transport Operators. SOZHT, 2024. – 30 p.]
3. V 2023 godu na seti ОАО «RZhD» perevezeno 1,2 mlrd passazhirov // Oficial'nyj sajt ОАО "RZhD" URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=290218&ysclid=luo29bboxa237661363> (data obrashhenija: 12.04.2024). [In 2023, 1.2 billion passengers were transported on the Russian Railways network // Official website of Russian Railways JSC URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=290218&ysclid=luo29bboxa237661363> (access date: 04/12/2024).]

4. Mitroshin S.G. Organizacija paromno-transportnyh logisticheskikh sistem (na primere Volzhsko-Kamskogo bassejna). Diss. na soisk. uch. stepeni k.t.n. po spec.05.22.19. Nizh. Novgorod: VGAVT, 2010. – 159 s. [Mitroshin S.G. Organization of ferry transport logistics systems (using the example of the Volga-Kama basin). Diss. for the job application uch. PhD degree on special 05.22.19. Lower Novgorod: VGAVT, 2010. – 159 p.]
5. Rekomendacii po tusheniju pozharov na zheleznodorozhnom transporte – SPb.: FGBUN Institut problem transporta im.N.S.Solomenko RAN, 2018 g. – 148 s. [Recommendations for extinguishing fires in railway transport - St. Petersburg: FGBUN Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko RAS, 2018 - 148 p.]
6. Tarancev A.A., Potashev D.A., Kuvatov V.I. Pozharovzryvobezопасnost' avtomobil'nyh palub (stojanok) na paromah // Morskie intellektual'nye tehnologii, №1, t.1, 2022, s.12-17. [Tarantsev A.A., Potashev D.A., Kuvatov V.I. Fire and explosion safety of car decks (parking lots) on ferries // Marine intelligent technologies, No. 1, vol. 1, 2022, pp. 12-17.]
7. Tarancev A.A., Potashev D.A., Skorohodov D.A. Osnovy upravlenija pozharovzryvobezопасnost'ju paromnyh avtoperevozok pri nalichii gazoballonnyh avtomobilej // Morskie intellektual'nye tehnologii, №4, t.1, 2022, s.279-283. [Tarantsev A.A., Potashev D.A., Skorokhodov D.A. Fundamentals of fire and explosion safety management of ferry road transportation in the presence of gas-cylinder vehicles // Marine intelligent technologies, No. 4, vol. 1, 2022, pp. 279-283.]
8. Tarancev A.A., Marinov M.L., Konovalov I.N. O sposobe modelirovanija pozharovzryvopasnyh situacij na paromah i plavuchih avtostojankah s ispol'zovaniem setej Markova // Morskie intellektual'nye tehnologii, №1, chast'.1, 2024, s.270-275. [Tarantsev A.A., Marinov M.L., Konovalov I.N. On a method for modeling fire and explosion hazard situations on ferries and floating parking lots using Markov networks // Marine intelligent technologies, No. 1, part 1, 2024, pp. 270-275.]
9. Pravila pozharnoj bezопасnosti na morskikh sudah. Postanovlenie Mintransa RF ot 31.10.2003 № 10. [Fire safety rules on sea vessels. Resolution of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 31, 2003 No. 10.]
10. Mezhdunarodnaja konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 g. SOLAS 74. Protokol 1988 g. (s izmenenijami). [International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974. SOLAS 74. Protocol, 1988 (as amended).]
11. Prikaz MChS Rossii ot 16.10.2017 g. № 444 "Ob utverzhenii Boevogo ustava podrazdelenij pozharnoj ohrany, opredelajushhego porjadok organizacii tushenija pozharov i provedenija avarijno-spasatel'nyh rabot. [Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated October 16, 2017 No. 444 "On approval of the combat regulations of fire departments, which determines the procedure for organizing fire extinguishing and carrying out emergency rescue operations.]
12. Tarancev A.A., Kozhevin D.F., Potashev D.A. O kaskadnom razvitii vzryvopozharnoj situacii na avtostojanke // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii. – 2023. – № 4. – S.16-25. [Tarantsev A.A., Kozhevin D.F., Potashev D.A. On the cascade development of an explosion and fire situation in a parking lot // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2023. – No. 4. – P.16-25.]
13. Tarancev A.A., Potashev D.A., Matveev A.V., Shkitronov M.E. O modelirovanii kaskadnogo razvitiija ChS pri pozharah v podzemnyh avtostojankah // Problemy upravlenija riskami v tehnosfere. – 2023. – №3 (67). – S. 131-140. [Tarantsev A.A., Potashev D.A., Matveev A.V., Shkitronov M.E. On modeling the cascade development of emergencies during fires in underground parking lots // Problems of risk management in the technosphere. – 2023. – No. 3 (67). – pp. 131-140.]
14. Kemeni D., Snell D. Konechnye cepi Markova. M.: Nauka, 1970. 271 s. [Kemeny D., Snell D. Finite Markov chains. M.: Nauka, 1970. 271 p.]
15. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972, 552 s. [Ventzel E.S. Operations research. M.: Soviet radio, 1972, 552 p.]
16. SP 485.131600.2020. SPPZ. Ustanovki pozharotushenija avtomaticheskie. Normy i pravila proektirovanija. [SP 485.131600.2020. SPZ. Automatic fire extinguishing installations. Design norms and rules.]
17. Tursenev S.A., Reshetov A.P., Kljuj V.V., Kosenko D.V. Pozharnaja taktika: spravochnik specialista. – SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MChS Rossii, 2019. – 140 s. [Tursenev S.A., Reshetov A.P., Klyuy V.V., Kosenko D.V. Fire tactics: a specialist's guide. – St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. – 140 p.]

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Таранцев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: info@iptran.ru

Alexander A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: info@iptran.ru

Маринов Марин Любенов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: marinlomsky@gmail.com

Marin L. Marinov, Ph.D. (Eng), leading researcher of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: marinlomsky@gmail.com

Коновалов Иван Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук (199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13); e-mail: info@iptran.ru

Ivan N. Konovalov, Ph.D. (Eng), senior researcher of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation), e-mail: info@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.04.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 06.05.2024.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 18000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**