



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1101001001001000101010101110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)

0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100

00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



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



THOMSON REUTERS WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S KNOWLEDGEBASE

№ 4 Часть 1 2022
№ 4 Part 1 2022

Morskie intelektual'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010

11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001

01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110

110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001

1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 1 2022 Сквозной номер 58

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 12 000 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

Проектирование и конструкция судов;

Теория корабля и строительная механика;

Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;

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

Информационно-измерительные и управляющие системы;

Системный анализ, теоретические основы информатики;

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;

Математическое моделирование и численные методы.

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

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

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».

Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2022



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 1 2022 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),
- Information-measuring and control systems,
- System analysis, foundations of Information Science,
- 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, 2022



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

Д.В. Никущенко, д.т.н., проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «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
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia
A.I. Frumen, PhD (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia
Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia
Yu.A. Vlasov, PhD (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA
M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia
A.Sh. Gotman, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberia State University of water transport, Novosibirsk, Russia
V.A. Evteev Phd (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia
I.I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation
V.V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, Sea Project, St. Petersburg, Russia
V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Николаевич Минаев**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Игоревич Притыкин**, доктор технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Евгений Борисович Карулин**, кандидат технических наук, доцент, Крыловский государственный научный центр
- **Андрей Григорьевич Шпекторов**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Владимир Антонович Туркин**, доктор технических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Евгений Геннадьевич Бурмистров**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Сергей Николаевич Беседин**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Владимирович Ярисов**, доктор технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта

- **Борис Федорович Дмитриев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Павлович Потехин**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Игорь Григорьевич Захаров**, доктор технических наук, профессор, ЦМКБ «Алмаз»
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Ольга Леонидовна Домнина**, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Валерий Иванович Плющаев**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Воршевский** доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Вячеслав Анатольевич Дюк**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук
- **Ян Янович Эглит**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander N. Minaev**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Galina V. German**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexej I. Pritykin**, Dr.Sci.(Eng), associate professor, Kaliningrad State Technical University
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Evgeny B. Karulin**, Ph.D. (Eng), associate professor, Krylov State Research Centre
- **Andrey Spektorov**, Ph.D. (Eng), associate professor, Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Jurij P. Potechin**, Ph.D. (Eng), associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Vladimir A. Turkin**, Dr. Sci (Eng), professor, Admiral Ushakov Maritime State University
- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named Admural G. I. Nevelskoy
- **Evgeny G. Burmistrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga state university of water transport
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Sergej N. Besedin**, Dr. Sci. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir V. Yarisov**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Immanuel Kant Baltic Federal University
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Yuri P. Potekhin**, Ph.D. (Eng), Saint Petersburg State Marine Technical University
- **Igor G. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ZMKB "Almaz"
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), professor State marine technical university of Saint-Petersburg

- **Olga L. Domnina**, Ph.D.(Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Valery I. Plyushchayev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Volga state University of water transport
- **Aleksandr A Vorshevskii**, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Saint Petersburg State Marine Technical University
- **Aleksey Yu. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Viacheslav A. Diuk**, Dr.Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **IAn IA. Eglit**, Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping



51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

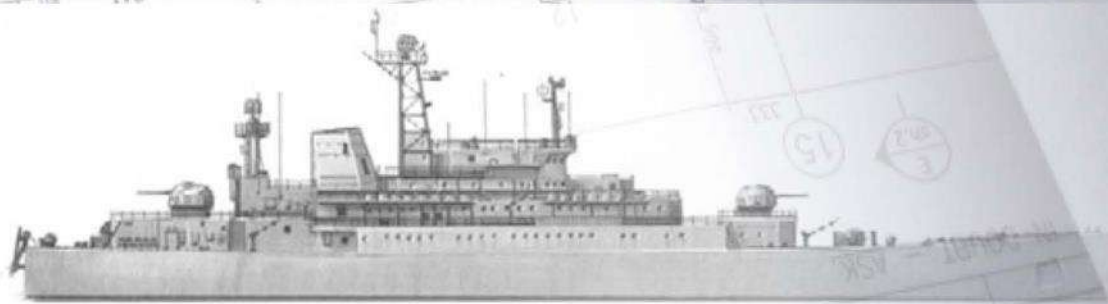
Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email: office@51cktis.ru

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ	стр
К 75-летию Игоря Григорьевича Захарова.....	14
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Попов В.В., Сорокин С.В. Уточненный анализ отражения изгибающей волны от кромки балки уменьшающейся толщины.....	20
Скуратов Н.А., Львова Е.Е., Суконнов А.В., Суконнова Т.Е. Исследование процесса подъема траловых мешков по слипам судов на модельной установке.....	26
Мизгирев Д.С., Борисов М.А. Экспериментальные исследования эффективности УФ-облучения для систем приточной вентиляции судовых помещений.....	33
Мизгирев Д.С., Гурьянов Н.М. Совершенствование судовых станций приготовления питьевой воды с использованием синергетического эффекта активированных окислительных технологий.....	40
Азовцев А.И., Огай С.А., Карпушин И.С. Облик мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах ограниченной грузоподъемности для арктического побережья.....	46
Назаров А.Г., Назарова С.Г. Анализ аварийности малых судов как основа нормирования их безопасности.....	52
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Чернышов А.В. Динамика речного водоизмещающего судна вблизи границы области устойчивости	58
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Филь А.В., Лебедев О.Ю., Рыбников Д.Ю. Влияние ширины и глубины канала на динамическую просадку.....	64
Бурыйлин Я.В., Гринек А.В., Бойчук И.П., Боран-Кешишьян А.Л., Кондратьев С.И. Комплекс программно-аппаратных средств для решения задач автономного судовождения.....	68
Полухин П.Д., Рубан А.Р., Кушнер Г.А., Волков Д.А. Исследование прочности на сжатие элементов корпуса судна, полученных методом 3D-печати.....	75
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Федотова И.А., Балицкая К.В., Розов А.Ю. Алгоритмы расчета устройства компенсации неактивной мощности преобразователя частоты для СЭЭС.....	82
Герасиди В.В., Лисаченко А.В. К вопросу о формировании трибодиагностических моделей судовых ВОД в эксплуатации.....	93
Городников О.А., Аввакумов А.Е., Шутов В.В. Экспериментальное исследование особенностей гидродинамики судового устройства для распыления сорбента.....	99
Туркин В.А., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С., Джиоев Р.И. Управление параметрами топливоподачи с целью снижения выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями	106
Панасенко А.А., Петрашёв С.В. Оценка эффективности работы теплообменного оборудования судового дизеля.....	113
Стаценко В.Н., Леонтьев Л.Б., Садыков Р.Х. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок.....	118
Руднев Б.И., Поваляхина О.В. Результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля.....	123
Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Оценка изменения технического состояния механических демпферов крутильных колебаний дизелей 8МАК25 в зависимости от наработки.....	128
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Гринек А.В., Бойчук И.П., Лицкевич С.А., Лицкевич О.Н., Кондратьев С.И. Повышение вероятности безотказной работы системы «человек-машина» для оператора МАНС.....	135
Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Савельев А.И. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов.....	144

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе.....	156
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива.....	162
Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М. Исследование временных рядов метеорологических наблюдений как признаков для прогноза скорости ветра в нейронной сети.....	170
Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Классификация и структурированное описание образов проблемной среды в модели представления знаний автономных интеллектуальных мобильных систем.....	177
Баскаков Д.Е., Кузнецова Е. Ю., Стариченков А.Л. Реализация легкой криптографии на эллиптических кривых для безопасности и конфиденциальности в киберфизических системах интеллектуального экологического мониторинга Северного морского пути.....	185
Селиверстов С.А., Халтурин А.А., Шафхатов Е.Р., Фахми Ш.С. Производительность морских видеосистем передачи изображений повышенной детальности.....	193
Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Алгоритмы семантической оперативной передачи морских изображений.....	201
Шаталова Н.В., Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Бородина О.В. Когнитивные транспортные видеосистемы: новый подход в сегментации изображений морских объектов.....	208
Малыгин И.Г., Коновалов И.Н. Структура интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути.....	215
Прозоровский Е.Е., Редькин Ю.В., Тюфанова А.А. Интеллектуализация информационных сетей с целью увеличения их производительности.....	222

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Заслонов В.В., Головина А.А. Метод диагностики, мониторинга элементов и узлов безэкипажного судна с применением AR-функционала.....	228
Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А. Д., Стариченков А.Л. Автоматизация расчетов подходного канала морского порта.....	236

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов.....	242
Ярошенко А.А., Маленко Ж.В., Маркина Е.В., Боран-Кешишьян А.Л., Кондратьев А.И. Изгибно-гравитационные волны в море с ледяным покровом от движущихся возмущений в условиях равномерного сжатия.....	251
Горенькова В.С., Кравец Ю.Д., Кириченко А.В. Математическая модель технологического процесса выгрузки грузов на необорудованное побережье с использованием саморазборных понтонов.....	258
Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д. Выбор формы функции аппроксимации размерений судов для целей проектирования морских портов.....	265
Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Метод расчета суммарных потерь на распространение звука в режиме разнесенного излучения и приема.....	272
Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей.....	279
Духнич Е.И. Обобщенная методология построения аппаратурно-ориентированных алгоритмов для цифровой обработки сигналов и изображений с использованием гиперкомплексных чисел различной размерности.....	284
Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Расчет изменения жесткости демпфера крутильных колебаний Geislinger D60/14/2 при износе пружин.....	289
Лисиенко С.В., Иванко Н.С., Учет и оптимизация издержек времени в рыбодобывающем процессе.....	295

CONTENTS	page
For Igor Zakharov's 75-th anniversary.....	14
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Vladimir V. Popov, Sergey V. Sorokin A refined analysis of a flexural wave's reflection at the edge of a beam with variable thickness.....	20
Nikolai A. Skuratov, Ekaterina E. Lvova, Anatolii V. Sukonnov, Tatyana E. Sukonnova Investigation of the process of lifting trawl bags on the slipway of the vessel on a model installation.....	26
Dmitry S. Mizgirev, Mikhail A. Borisov Experimental studies of the effectiveness of UV irradiation for supply ventilation systems of ship premises.....	33
Dmitriy S. Mizgirev , Nikolay M. Guryanov Improvement of ship stations for the preparation of drinking water using the synergistic effect of activated oxidation technologies.....	40
Anatoli I. Azovtsev, Sergey A. Ogay, Ivan S. Karpushin The layout seagoing all-terrain vehicle on air-cushion caterpillars a smaller cargo carrying capacity for arctic shore.....	46
Albert G. Nazarov, Svetlana G. Nazarova Analysis of accidents with small craft as basis for their safety regulation.....	52
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Andrey V. Chernyshov Dynamics of a river displacement vessel in the course stability neighborhood.....	58
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Alexander V. Fil, Oleg Yu. Lebedev, Dmitry Yu Rybnikov Influence of the width and depth of the channel on the dynamic landing of the vessel.....	64
Yaroslav V. Burylin, Anna V. Grinek, Igor P. Boychuk, Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey I. Kondratyev Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation...	68
Pavel D. Polukhin, Anatoliy R. Ruban, Guriy A. Kushner, Dmitri A. Volkov Investigation of the compressive strength of ship hull elements obtained by 3D printing.....	75
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Boris F. Dmitriev, Sergey Ya. Galushin, Iraida A. Fedotova, Ksenia V. Balitskaya, Alexei J. Rozov Algorithms for calculation of inactive power compensation device of frequency converter for marine systems.....	82
Viktor V. Gerasidi, Aleksey V. Lisachenko On the issue of the formation of tribodiagnostic models of ship WATERS in operation.....	93
Oleg A. Gorodnikov, Andrei E. Avvakumov, Vasiliy V. Shutov Experimental study of the hydrodynamics features of a shipboard sorbent spraying device.....	99
Vladimir A. Turkin, George V. Ignatenko, Vladimir V. Belyaev, Sergey S. Zubko, Ruslan I. Dzhioev Fuel management to reduce carbon dioxide emissions from marine diesel engines.....	106
Andrei A. Panasenko, Sergey V. Petrashev. Evaluation of the efficiency of the heat exchange equipment of a marine diesel engine.....	113
Vladimir N. Statsenko, Lev B. Leont'ev , Ruslan H. Sadykov Research of film liquid neutralization of gas emissions from ship power plants.....	118
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Results of experimental investigation of local heat fluxes on surface of cap cylinders of marine high speed diesel.....	123
Mikhail N. Pokusaev, Konstantin O. Sibrayev, Maksim M. Gorbachev, Adel D. Ibadullaev Assessment of changes in the technical condition of mechanical dampers of torsional vibrations of diesel engines 8MAK25 depending on the operating time.....	128
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Anna V. Grinek, Igor P. Boychuk, Sergey A. Lickevich, Olga N. Lickevich, Sergey I. Kondratyev Increasing the probability of failure-free operation of the man-machine system when implementing monitoring for the autonomous vessel operator.....	135
Konstantin D. Krestovnikov, Aleksei A. Erashov, Anton I. Saveliev Approach to wireless battery charging of autonomous underwater vehicles.....	144

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev Probability function of waiting for double threshold detector.....	156
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov Estimated safety assessment of spent nuclear fuel transportation.....	162
Dmitry N. Kobzarenko, Ayshat M. Kamilova Research time series of meteorological observations as features for wind speed forecasting in a neural network.....	170
Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov Classification and structured description of images of the problem environment in the knowledge representation model of autonomous intelligent mobile systems....	177
Dmitriy E. Baskakov, Elena Y. Kuznetsova, Aleksey L. Starichenkov Implementation of Lightweight Elliptic Curve Cryptography for Security and Privacy in Cyber-Physical Systems of Intelligent Environmental Monitoring for the Northern Sea Route.....	185
Svyatoslav A. Seliverstov, Artyom A. Khalturin, Ershat R. Shafhatov., Shakeeb S. Fahmi Performance of marine video systems for transmitting images of increased detail.....	193
Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina Algorithms of semantic operational transmission of marine images.....	201
Natalia V. Shatalova, Shakeeb S. Fahmi, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina Cognitive transport video systems: a new approach in segmentation of marine objects images.....	208
Igor G. Malygin, Ivan N. Konovalov The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route.....	215
Evgeniy E. Prozorovskiy Yuriy V. Redkin Anastasia A. Tyufanova Intellectualization of information networks in order to increase their productivity.....	222

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Vladimir V. Zaslouov, Anastasia A. Golovina Method of diagnostics, monitoring of elements and assemblies of an unmanned vessel using AR-functionality.....	228
Alexander L. Kuznetsov, Alexander V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Aleksey L. Starichenkov Automatization of seaports approach channel design calculations.....	236

MATHEMATICAL MODELLING, AND NUMERICAL PROCEDURES

Igor M. Dantsevich, Valery F. Lubentsov Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in operating functions management remotely operated underwater vehicle.....	242
Alexander A. Yaroshenko, Zhanna V. Malenko, Elena V. Markina, Anastas L. Boran-Keshishiyan, Aleksey I. Kondratyev Flexural-gravitational waves in the sea with ice cover from moving disturbances under conditions of uniform compression.....	251
Victoria S. Gorenkova, Yuri D. Kravets, Aleksandr V. Kirichenko Mathematical model of the technological process of unloading cargoes on the unequipped coast with the use self-assemblable pontoons.....	258
Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D The choice of approximation function of ships' dimensions for the purposes of seaport design.....	265
Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychkova Method for calculating the total loss for sound propagation in the mode of spaced radiation and reception.....	272
Alexander A. Tarantsev, Dmitriy A Potashev. Dmitriy A. Skorokhodov Fundamentals of management of fire and explosion safety of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles.....	279
Evgeniy I. Dukhnich Generalized methodology for constructing hardware-oriented algorithms for digital signal and image processing using hypercomplex numbers of various dimensions.....	284
Mikhail N. Pokusaev, Konstantin O. Sibrayev, Maksim M. Gorbachev, Adel D. Ibadullaev Calculation of the change in the stiffness of the Geislinger D60/14/2 torsional vibration damper during spring wear.....	289
Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko Accounting and optimization of time costs in the fishing process....	295

К 75-летию Игоря Григорьевича Захарова



26 декабря 2022 года исполнилось 75 лет заместителю генерального конструктора по перспективному проектированию, главному конструктору проекта АО ЦМКБ «Алмаз», доктору технических наук, профессору контр-адмиралу запаса Игорю Григорьевичу Захарову, одному из ведущих специалистов современного отечественного кораблестроения.

Игорь Григорьевич родился в Ленинграде. После окончания школы поступил в Ленинградский кораблестроительный институт. Однако, окончив два курса, понял, что его призвание – это Военно-Морской Флот. В 1967 году по собственной инициативе, он перешел на второй курс кораблестроительного факультета Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского, которое окончил в 1971 году.

Служба молодого лейтенанта проходила на кораблях Черноморского и Северного флотов: командиром группы на БПК «Сметливый» (рис. 1).



Рис.1. БПК пр.61

Затем на первом отечественном авианосце – головном авианесущем крейсере проекта 1143 «Киев» (рис.2). Знакомство с крейсером И.Г. Захарова началось еще в процессе строительства корабля на Черноморском судостроительном заводе в Николаеве. Это было не только познавательно, но и способствовало профессиональному становлению перспективного инженера-кораблестроителя.



Рис.2. Авианесущий крейсер пр. 1143 «Киев»

Пять лет корабельной службы явились хорошей практикой для дальнейшего служебного роста. Это и произошло в 1977 году – Игорь Григорьевич поступил на кораблестроительный факультет Военно-морской академии им. А.А. Гречко. После окончания с отличием академии в 1979 году его служба проходила в военном представительстве и в Главном управлении кораблестроения ВМФ.

Однако истинным призванием И.Г. Захарова была наука. В 1983 году после успешной защиты кандидатской диссертации он был назначен преподавателем в Военно-морскую академию, а в 1989 году стал старшим преподавателем кафедры военного кораблестроения. Здесь он разработал новый курс теории проектирования надводных кораблей и создал курс концептуального анализа в военном кораблестроении. Под его руководством была создана исследовательская и обучающая система автоматизированного проектирования кораблей «Оценка».

В 1988 году состоялась защита докторской диссертации, а четыре года спустя, в 1992 году он был назначен начальником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ. Для страны, Вооруженных Сил и флота это были трудные годы, рушилось многое, в том числе и в военно-морской науке. Новому начальнику 1 ЦНИИ МО РФ предстояло не только защитить Институт от пагубных тенденций, но и найти пути его развития в новых условиях. Эту задачу контр-адмирал И.Г. Захаров решил и решил с успехом (рис.3).



Рис.3. начальник 1 ЦНИИ МО РФ И.Г. Захаров

Институт не только сохранил свои позиции в отечественном кораблестроении, но и получил дальнейшее развитие. Одним из принципиальных направлений в научной деятельности Института явилось дальнейшее развитие и совершенствование системы автоматизированного исследовательского проектирования кораблей и судов (САИПР «Чертеж-4»). Личной заслугой И.Г. Захарова явилось внедрение в САИПР метода многокритериальной оптимизации многоцелевого боевого корабля (рис.4).

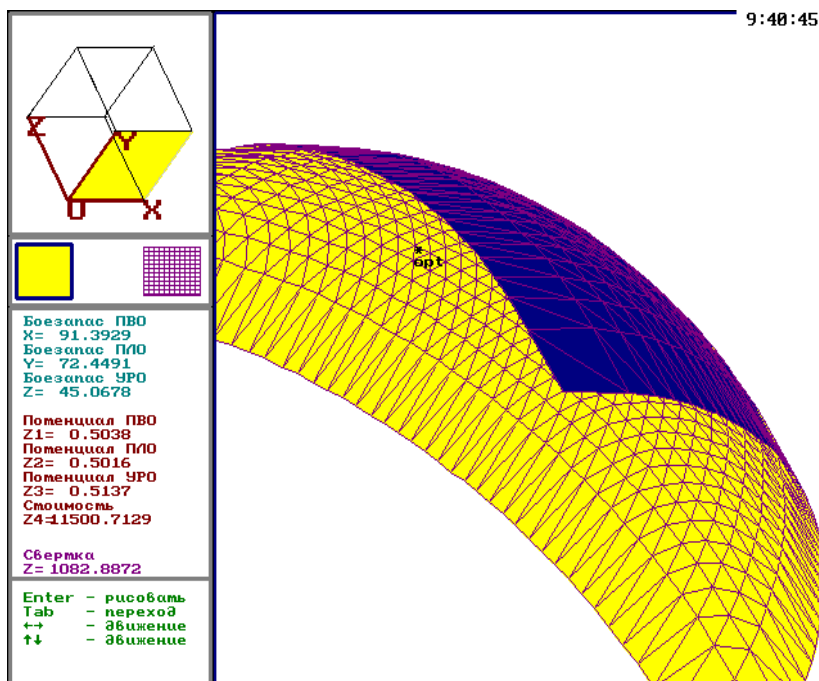


Рис. 4. Визуализация области Парето

Активное внедрение САИПР в научную деятельность Института позволило начинать процесс проектирования корабля с формирования общего замысла по его созданию, основываясь на возлагаемые на корабль задачи и достижения научно-технического прогресса (рис.5).

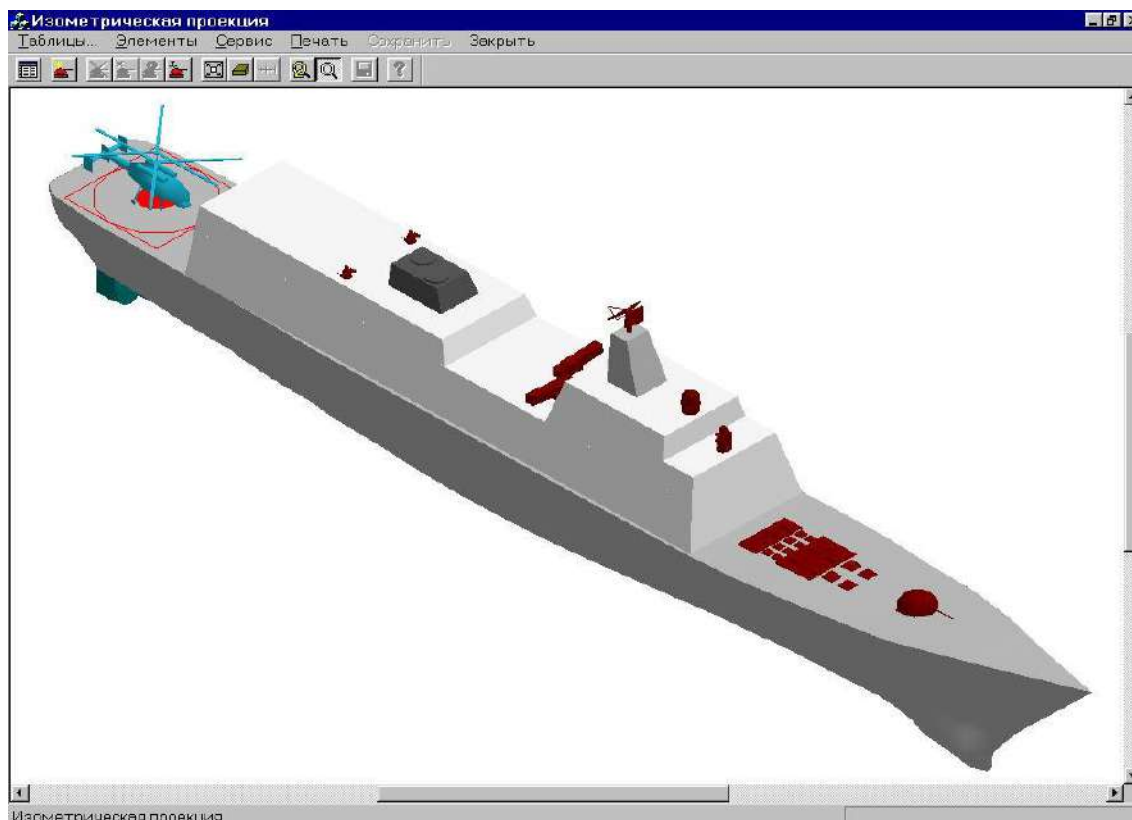


Рис.5. 3-D проекция исследовательского проекта фрегата

Возглавляя Институт, И.Г. Захаров внес весомый личный вклад в обоснование направлений развития корабельного состава ВМФ России, создание уникальной лабораторно-экспериментальной базы, разработку нормативных, методических и эксплуатационных документов флота, создание автоматизированных систем моделирования и проектирования кораблей, теоретического аппарата анализа мирового рынка военного кораблестроения. Результаты этой работы получили реализацию в концепциях развития ВМФ различных годов, в проектах Государственных программ вооружения и экспортных программах кораблестроения. И.Г. Захаров активно возглавлял разработку комплексных целевых программ при строительстве головных подводных лодок и надводных кораблей четвертого поколения. Под его руководством были разработаны ТТЗ на создание корвета проекта 20380 типа «Стерегущий» и фрегата проекта 22350 типа «Адмирал Флота Советского Союза Горшков».

После ухода в 2006 году в запас И.Г. Захаров работал Главным научным сотрудником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, с 2008г. – руководителем подразделения, вице-президентом ОАО «Объединенная судостроительная корпорация». С 2010 г. по настоящее время И.Г. Захаров – заместитель генерального конструктора АО ЦМКБ «Алмаз» по перспективному проектированию и главный конструктор перспективного корвета нового поколения проекта 20386 (рис.6).

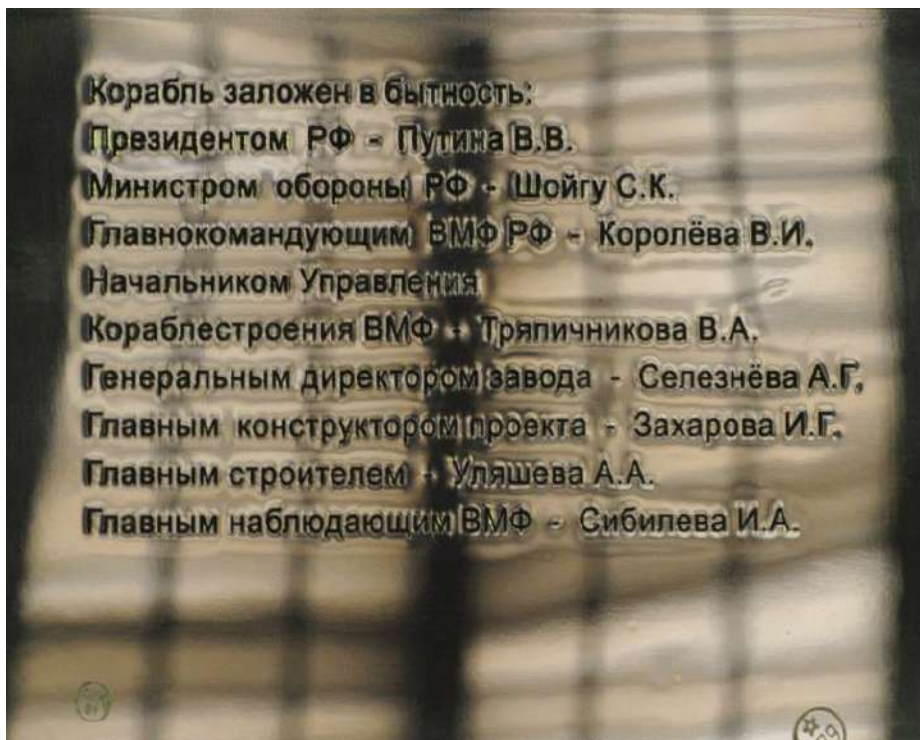


Рис.6. Закладная доска Корвета. Гл. конструктор И.Г. Захаров

Основными направлениями научной деятельности доктора технических наук, профессора И.Г. Захарова являются: разработка методов решения задач оптимизации сложных военно-технических систем, теоретические основы концептуального проектирования, методы автоматизированного исследовательского проектирования, научные принципы и методы обоснования кораблестроительных программ, теория и методы маркетинговых исследований при формировании экспортных программ (рис.7,8,9).



Рис. 7. Корвет проекта 20380



Рис. 8. Фрегат проекта 22350

И.Г. Захаров – автор около 200 научных трудов, в том числе двух учебников и пяти монографий. Награжден орденами: «За службу Родине в ВС СССР» 3 степени (1977), «Почета» (1995), «За военные заслуги» (2000), медалями, лауреат Государственной премии РФ (2002).



Рис. 9. Корвет проекта 20386

Сердечно поздравляем, Вас уважаемый Игорь Григорьевич с юбилеем, желаем здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной деятельности на благо России.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.017>

Уточненный анализ отражения изгибной волны от кромки балки уменьшающейся толщины

В.В. Попов¹ v.popof@mail.ru, С.В. Сорокин¹ sorokins@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Публикация в 1987 году статьи М.А. Миронова о полном отсутствии отражения изгибной волны от кромки балки переменной толщины в случае, когда толщина кромки равна нулю, послужила толчком к развитию целого направления вибро-акустики, получившего в современной литературе название «теория акустических чёрных дыр» [1]. Как отмечалось самим М.А. Мироновым, свести толщину до нуля практически невозможно, и им был предложен упрощенный способ учета ненулевой толщины кромки. Новизна исследования, результаты которого представлены в данной статье, состоит в строгом учете конечного значения толщины кромки, и, соответственно, в уточнении формы профиля участка переменной толщины. Аналитическое решение задачи нахождения коэффициента отражения позволило провести исследование его зависимости от параметров «акустической чёрной дыры» и оценить погрешность упрощенного описания. В статье показано, что упрощения несколько завышают величину коэффициента отражения и, таким образом, дают осторожную оценку эффективности «акустических чёрных дыр».

Ключевые слова: балка переменной толщины, изгибная волна, коэффициент отражения, условие плавности профиля, эффект «акустической чёрной дыры».

Для цитирования: Попов В.В., Сорокин С.В. Уточненный анализ отражения изгибной волны от кромки балки уменьшающейся толщины. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 20—25.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.017>

A refined analysis of a flexural wave's reflection at the edge of a beam with variable thickness

Vladimir V. Popov¹ v.popof@mail.ru, Sergey V. Sorokin¹ sorokins@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. In 1987, M.A. Mironov published a seminal paper, in which he demonstrated that a flexural wave is completely absorbed at the edge of a beam with decreasing thickness. This effect was shown to exist provided that a thickness of the plate vanishes at its edge. As generally recognized in the modern literature, M.A. Mironov is a founder of the novel branch of vibro-acoustics customarily referred to as a «theory of acoustic black holes». However, it is not feasible to manufacture a beam with the zero thickness of its edge, and M.A. Mironov has come up with a simple approximate way to account for a finite edge thickness. The novelty of our contribution is a rigorous formulation of the wave reflection problem and its closed form analytical solution. It has entailed a modification of the profile of 'acoustic black hole' and facilitated parametric studies of its performance. As demonstrated in the paper, the approximate method, proposed by M.A. Mironov, slightly overestimates the magnitude of the reflection coefficient and, therefore, provides a conservative assessment of the efficiency of an «acoustic black hole».

Keywords: beam of variable thickness, flexural wave, reflection coefficient, smoothness condition, «acoustic black hole» effect.

For citation: Vladimir V. Popov, Sergey V. Sorokin, A refined analysis of a flexural wave's reflection at the edge of a beam with variable thickness. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 20—25.

Введение

В данной статье предложен способ уточнения формы профиля участка переменной толщины, который изначально был предложен М.А. Мироновым в 1987 году. Аналитическое решение задачи по нахождению коэффициента отражения, позволяет оценить погрешность упрощенной записи. Исследование также позволяет оценить влияние параметров «акустической чёрной дыры» на получаемый коэффициент отражения. В

дальнейшем В.В. Крыловым был проведен анализ различных форм акустических чёрных дыр, в том числе и двумерных. Помимо этого, В.В. Крылов рассматривал введение в конструкцию тонких слоев на поверхности пластин, что позволяло дополнительно снизить вибрацию [5, 10]. На практике, основываясь на исследованиях В.В. Крылова, с помощью лазера проверялась эффективность работы двумерной чёрной дыры [13]. Проводились исследования степенного закона и высоты сечения для балочной конструкции с целью

определения оптимального профиля клина чёрной дыры [9]. Были проведены попытки проектирования геометрической нелинейности для передачи энергии с низких частот на высокие, на которых эффект акустической чёрной дыры усиливается [11, 12].

В настоящее время акустические метаматериалы являются активно исследуемой темой, в рамках снижения вибрации конструкций. Одним из направлений использования метаматериалов стало использование эффекта акустической черной дыры. Важно понимать, что в практических задачах, коэффициенты отражения акустических метаматериалов стремятся к нулю. Повышенный интерес к метаматериалам был вызван работой Миронова [1]. Опираясь на его работу, было проделано исследование данного эффекта [2]. Исследование вообрало в себя как введение в данную тему, вместе со статистикой растущего к ней интереса, так и различные вариации конструкций с подробным пояснением проработанной работы. Были проведены исследования по нахождению оптимального профиля для акустической чёрной дыры [3]. В статье, посвященной этому исследованию, подробно изложен подход к пластине с клиновидным профилем. Говоря об акустической чёрной дыре с клиновидным профилем, нельзя не упомянуть статьи Крылова В. В. [4, 5]. В них развернуто описывается работа с коническими пластинами. В одной из статей также проводится эксперимент с введением демпфирующего слоя в профиль чёрной дыры для более эффективного поглощения изгибных колебаний [5].

Постановка задачи

Рассматривается классическая модель балки Бернулли-Эйлера и распространение по ней гармонической изгибной волны. Предполагается, что толщина балки меняется в зависимости от координаты.

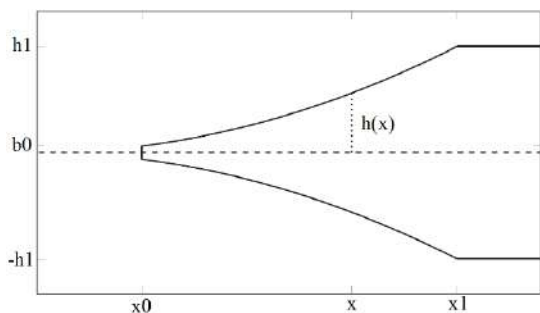


Рис 1. Вид акустической чёрной дыры

При наличии потерь в материале балки, волновое число становится комплексно-значным.

$$k = \left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{пл}(1+i)h^2(x)} \right)^{1/4} \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, ω – частота, $E_{пл}$ – пластиночный модуль Юнга, Q – коэффициент добротности, i – мнимая единица, h – половина толщина пластины.

Чем больше коэффициент добротности, тем меньше коэффициент потерь η .

$$Q = \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

Очевидно, что, вследствие диссипации энергии, изгибная волна в бесконечной балке будет затухать по мере удаления от источника. Допустим, что балка является полубесконечной, так что падающая волна отражается от её края. При это мы сделаем еще одно допущение: «на бесконечности», т.е. достаточно далеко от края, толщина балки постоянна (см. Рис.1), и потерями в её материале можно пренебречь. Тогда величина коэффициента отражения от края будет определяться по формуле [1].

$$W = e^{-2 \cdot \int_{x_0}^{x_1} \text{Im } k \, dx} \quad (3)$$

Понятно, что, если показатель экспоненты будет представлять собой большое по модулю отрицательное число, то коэффициент отражения будет исчезающе мал. Иными словами, изгибная волна будет поглощена на кромке. Этот факт и послужил причиной названия данного эффекта «чёрная дыра».

Выписанная выше формула для коэффициента отражения является упрощенной. Её достоверность определяется выполнением неравенства [1].

$$\left| \frac{1}{k^2} \frac{dk}{dx} \right| \ll 1 \quad (4)$$

В статье Миронова особое внимание уделяется профилю изменения толщины балки вида $h(x) = ax^2$. Данный профиль начинается с нулевой толщины, однако при дальнейшем интегрировании за начало берется ненулевая толщина в некоторой точке $x_0 \neq 0$. Управление коэффициентом отражения происходит с помощью выставления пределов функции и множителя a . В классическом представлении толщины регулируются, когда выбираются координаты начала x_0 и конца x_1 акустической черной дыры в качестве пределов интегрирования. Естественно, чтобы полностью исключить отражение волны от кромки необходимо взять $x_0=0$, но на практике толщина пластины остается конечной. Начальную точку x_0 выбирают с некоторым разумным отступом от нулевого значения координаты x . В точке x_1 толщина пластины выходит на номинальное значение h_1 и не меняется при дальнейшем росте координаты x .

В дальнейшем рассуждении мы предполагаем, что чёрная дыра по Миронову начинается с нулевой толщины и выходит на толщину равную единице. Помимо этого, мы переходим к безразмерным величинам, принимая за единицу длины толщину балки «на бесконечности». В этой постановке коэффициент отражения всегда будет равен нулю в нулевой координате, независимо от параметра a . В связи с этим, в классической постановке задачи, для взятия интеграла необходимо отступить от начала координат и обрезать кромку в некоторой координате x_0 , которая будет считаться началом чёрной дыры.

В классическом методе мы получаем начальную высоту путем отступления от начала координат в точку $x_0 \neq 0$. В нашей уточненной функции мы подходим к построению профиля акустической чёрной дыры более строго, поскольку сразу задаем обе высоты b_0 и h_1 . Это позволяет лучше

контролировать форму чёрной дыры с помощью входных параметров, что облегчает дальнейший подбор её оптимальной формы.

В данной статье предлагается модифицированная функция толщины пластины вида $h=b_0+a_1 \cdot x^2$. Идея заключается во внедрении задаваемой толщины пластины в начале координат b_0 в функцию толщины h . Работа с классической функцией подразумевает работу с ней, начиная с некоторого нижнего предела x_0 . Как можно видеть на рис. 2, при заданных параметрах $x_0=1$, $b_0=0.01$, $a=0.01$, $a_1=0.012$, $h_1=1$ форма акустической чёрной дыры для двух постановок совпадает, но не полностью. Далее в статье все графики приводятся для заданных выше значений.

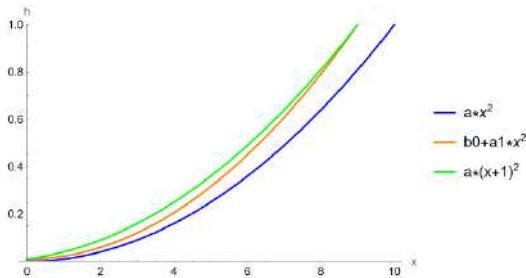


Рис. 2. Сравнение профилей акустической черной дыры по классической и модифицированной функции (показана верхняя половина балки, представленной на рис. 1)

Имея значения начальной толщины клина b_0 и начальной координаты x_0 , мы можем определить коэффициент a .

$$a \cdot x_0^2 = b_0 \quad (5)$$

Следует обратить внимание, что выбор начальной координаты x_0 , при заданной начальной высоте b_0 , определяет длину чёрной дыры.

Далее, задаваясь необходимой толщиной пластины h_1 , мы определяем расстояние x_1 , на котором акустическая черная дыра заканчивается и выходит на толщину пластины h . За значение толщины пластины берется $h_1=1$, координата x откладывается в долях толщины пластины $h_{пл} = h_1 = 1$.

$$a \cdot x_1^2 = h_1 \quad (6)$$

В нашем случае функция начинается в нуле, поэтому необходимо сдвинуть её влево так, чтобы значение функции Миронова в точке x_0 равнялось значению модифицированной функции в нуле. Иными словами, необходимо сделать равными значения толщины в начале и в конце чёрных дыр, профиль которых задан по формулам $h = a \cdot x^2$ и $h = b_0 + a_1 \cdot x^2$. Обе функции рассматриваются на участках одинаковой длины.

$$b_0 + a_1 \cdot (x - x_0)^2 = h_1 \quad (7)$$

Из условия

$$a_1 = \frac{(h_1 - b_0)}{(x_1 - x_0)^2} \quad (8)$$

мы можем найти коэффициент a_1 для нашей видоизменной функции. Как можно видеть, для подбора коэффициента a_1 используется оба

предела функции, в отличие от классического метода. Практический интерес представляет собой сравнение коэффициентов отражения классической и модифицированной функции.

Анализ результатов

Далее следует проследить за тем, как варьирование параметров сказывается на разнице коэффициентов отражения W . Из варьируемых параметров имеется начальная высота b_0 и начальный отступ x_0 . Конечная высота акустической черной дыры (высота пластины) h_1 равна единице.

Будем сравнивать значение коэффициентов отражения функции Миронова W_m и нашей функции W_n при изменении начальной высоты b_0 . Поэтому, для начала, запишем ниже процесс получения коэффициентов отражения для обоих случаев

$$W_m = e^{-2 \cdot \int_{x_0}^{x_1} \text{Im}[k_1] dx}, \quad (9)$$

$$W_n = e^{-2 \cdot \int_0^{x_1 - x_0} \text{Im}[k_2] dx}. \quad (10)$$

Волновые числа выглядят следующим образом:

$$k_1 = \left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{пл}}\right)^{1/4} \cdot \frac{1}{\sqrt{a} x}, \quad (11)$$

$$k_2 = \left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{пл}}\right)^{1/4} \cdot \frac{1}{\sqrt{b_0 + a_1 \cdot x^2}}. \quad (12)$$

Тогда итоговые выражения для коэффициентов отражения будут

$$W_m = \frac{1}{2 \cdot Q} \frac{1}{\sqrt{a}} \left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{пл}}\right)^{1/4} (\text{Log}[x_1] - \text{Log}[x_0]), \quad (13)$$

$$W_n = \frac{1}{2 \cdot Q} \frac{1}{\sqrt{a_1}} \left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{пл}}\right)^{1/4} \left(\text{ArcTan}h \left[\frac{\sqrt{a_1} \cdot (x_1 - x_0)}{\sqrt{b_0 + a_1 \cdot (x_1 - x_0)^2}} \right] - \text{ArcTan}h \left[\frac{\sqrt{a_1} \cdot 0}{\sqrt{b_0 + a_1 \cdot 0^2}} \right] \right). \quad (14)$$

Оба коэффициента отражения зависят от начальной высоты b_0 . Для классической функции начальная высота определит начальный отступ x_0 , а для модифицированной функции он напрямую задаст высоту в клине. Из рис. 3 можно видеть, что значение для нашего коэффициента отражения получается меньше, чем у классической функции. Следует обратить внимание на то, что вне чёрной дыры пластина имеет толщину равную единице. Поэтому большое значение начальной высоты b_0 означает, что пластина почти не меняет свою толщину.

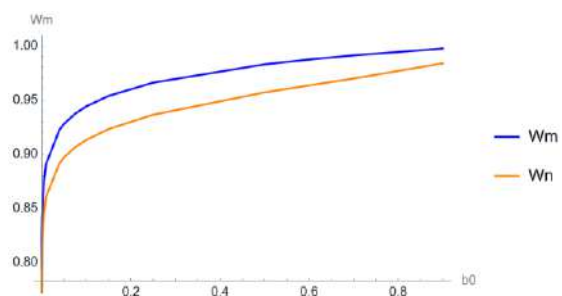


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от начальной высоты b_0 .

Получается, что модифицированной функцией прогнозируется меньшее отражение. Обращаясь к рис.5 мы можем видеть, что наша функция всегда имеет меньший коэффициент отражения, в сравнении с функцией Миронова. Коэффициент добротности Q показывает, что чем меньше в конструкции демпфирования, тем хуже работает акустическая чёрная дыра. Помимо этого, с ростом частоты колебаний Ω возрастает и эффективность поглощения колебаний.

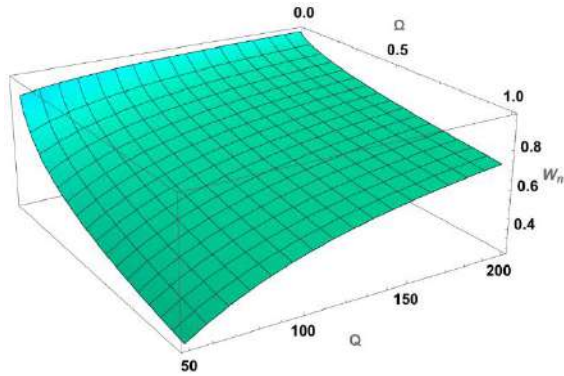


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения модифицированной функции от безразмерной частоты колебаний Ω и коэффициента добротности Q.

Безразмерная частота колебаний записывается как

$$\Omega = \frac{\omega \cdot h_1}{c}, \quad (15)$$

где скорость звука запишется как

$$c = \sqrt{\frac{E_{пл}}{\rho}}. \quad (16)$$

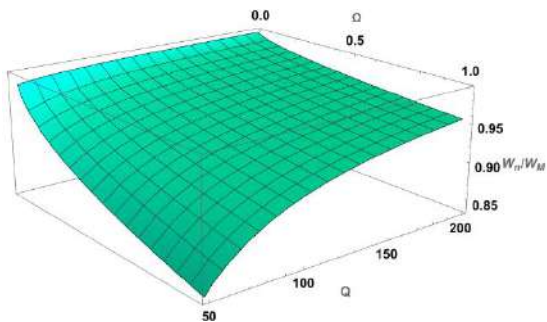


Рис. 5. Отношение коэффициентов отражения.

При рассмотрении зависимости коэффициента отражения W от начального отступа x_0 получается, что значение первого остается постоянным. Однако, с ростом начальной координаты черной дыры, за счет пропорционального увеличения координаты x_1 , на которой пластина выходит на единичную толщину.

По формуле (1) мы получаем локальные волновые числа. Строго говоря, они соответствуют бесконечной пластине постоянной толщины, которая равна толщине в рассматриваемой точке. Допустимость использования этих формул была исследована многими авторами при помощи метода ВКБ [6]. Применимость формул определяется

степенью выполнения неравенства (4) в каждом сечении балки.

Значения начальной координаты и начальной высоты пластины для сравнения на рисунках ниже примем равными $x_0=1$ и $b_0=0.01$ соответственно. В классическом методе данное условие будет постоянным по всей длине чёрной дыры и будет определяться выражением \sqrt{a} . Подставляя в условие плавности числовые значения, приведенные Мироновым в конце статьи, мы получим значение $0.316 \ll 1$.

В случае модифицированного метода условие будет зависеть от координаты длины x

$$\frac{0.012 \cdot x}{\sqrt{0.01 + 0.012 \cdot x^2}} \ll 1. \quad (17)$$

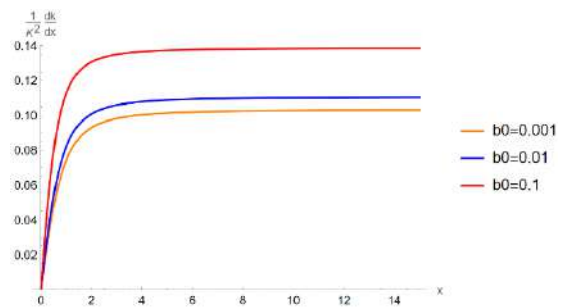


Рис. 6. График зависимости условия плавности от координаты x при изменении начальной высоты b_0 .

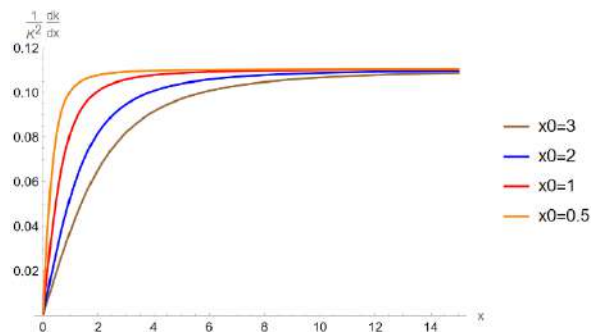


Рис. 7. График зависимости условия плавности от координаты x при изменении начальной координаты x_0 .

Как видно на рис. 6 и рис. 7, максимальное значение условия плавности принимает значение меньше, чем в классической функции. Из этого следует, что модифицированная функция лучше удовлетворяет условию достаточной плавности изменения пластины. Также видно, что определяющим фактором для условия плавности является выбор начальной высоты b_0 .

Закключение

Таким образом, строгий учёт конечного значения толщины кромки и, соответственно, изменение профиля участка переменной толщины позволило уточнить решение, полученное Мироновым. При этом оказалось, что, во-первых, решение Миронова завышает величину коэффициента отражения (и тем самым, уменьшает эффективность «акустической чёрной дыры») и, во-вторых, предложенная новая форма её профиля лучше удовлетворяет условию достаточной плавности изменения толщины. Кроме

того, введение в рассмотрение новых (по сравнению с моделью Миронова) параметров позволило более детально изучить поведение коэффициента отражения и критерия гладкости.

Литература

1. Миронов М.А. Распространение изгибающей волны в пластине, толщина которой плавно уменьшается до нуля на конечном интервале // *Акустический журнал*. Изд-во «Наука». 1988. Т. 34. №3. С. 546–547..
2. Pelat A., Gautier F., Conlon S.C., Semperlotti F. The acoustic black hole: A review of theory and applications // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 476. 115316.
3. Støttrup B. B., Sorokin S., Cornean H.D. A rigorous approach to optimal profile design for acoustic black holes // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2021. Vol. 149(1), P. 447–456.
4. Krylov V.V., Winward E. Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates // *Journal of Sound and Vibration*. 2007. Vol. 300(1), P. 43–49.
5. Krylov V.V., Tilman F. J. B. S. Acoustic «black holes» for flexural waves as effective vibration dampers // *Journal of Sound and Vibration*. 2004. Vol. 274(3), P. 605–619.
6. Feurtado P.A., Conlon S.C., Semperlotti F. A normalized wave number variation parameter for acoustic black hole design // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2014. Vol. 136(2), P. 148–152.
7. Krylov V.V. New type of vibration dampers utilising the effect of acoustic black holes // *Acta Acustica united Acustica*. 2004. Vol. 90 (5). P. 830–837.
8. Lee J.Y., Jeon W. Vibration damping using a spiral acoustic black hole // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 141 (3). P. 1437–1445.
9. Hook K., Cheer J., Daley S. A parametric study of an acoustic black hole on a beam // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019. Vol. 145 (6). P. 3488–3498.
10. Krylov V.V. Acoustic Black Holes: Recent Developments in the Theory and Applications // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2014. P. 1269-1306.
11. Gusev V.E., Ni C., Lomonosov A., Shen Z. Propagation of flexural waves in inhomogeneous plates exhibiting hysteretic nonlinearity: nonlinear acoustic black holes // *Ultrasonics*. Vol. 61. 2015. P. 126–135.
12. Denis V., Pelat A., Touzé C., Gautier F. Improvement of the acoustic black hole effect by using energy transfer due to geometric nonlinearity // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol. 94. 2017. P. 134–145.
13. Yan S., Lomonosov A.M., Shen Z., Evaluation of an acoustic black hole's structural characteristics using laser-generated lamb waves // *Laser Physics. Letter* 13 (2). 2016. 025003.

References

1. Mironov M.A. Rasprostranenie izgibnoj volny v plastine, tolshhina kotoroj plavno umen'shaetsja do nulja na konechnom intervale [Propagation of a bending wave in a plate whose thickness gradually decreases to zero at a finite interval]. *Acoustic Journal*. Izd «Nauka». 1988. 34(3). S. 546–547.
2. Adrien Pelat, François Gautier, Stephen C. Conlon, Fabio Semperlotti. The acoustic black hole: A review of theory and applications. *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 476. 115316.
3. Benjamin B. Støttrup, Sergey Sorokin, Horia D. Cornean. A rigorous approach to optimal profile design for acoustic black holes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 149(1), 2021. 447–456.
4. V. V. Krylov and R. E. T. B. Winward, Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates. *Journal of Sound and Vibration*. 2007. Vol. 300(1), 43–49.
5. V. V. Krylov and F. J. B. S. Tilman, Acoustic «black holes» for flexural waves as effective vibration dampers. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 274(3), 2004, 605–619.
6. Philip A. Feurtado, Stephen C. Conlon and Fabio Semperlotti. A normalized wave number variation parameter for acoustic black hole design. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 136(2), 2014, 148–152.
7. V.V. Krylov, New type of vibration dampers utilising the effect of acoustic black holes', *Acta Acustica united Acustica* Vol. 90 (5), 2004. 830–837.
8. J.Y. Lee, W. Jeon, Vibration damping using a spiral acoustic black hole, *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 141 (3), 2017. 1437–1445.
9. K. Hook, J. Cheer, S. Daley, A parametric study of an acoustic black hole on a beam. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 145 (6), 2019, 3488–3498.
10. V.V. Krylov. Acoustic Black Holes: Recent Developments in the Theory and Applications. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2014. P. 1269-1306.
11. V.E. Gusev, C. Ni, A. Lomonosov, Z. Shen, Propagation of flexural waves in inhomogeneous plates exhibiting hysteretic nonlinearity: nonlinear acoustic black holes, *Ultrasonics* 61 (2015) 126–135.
12. V. Denis, A. Pelat, C. Touzé, F. Gautier, Improvement of the acoustic black hole effect by using energy transfer due to geometric nonlinearity, *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 94 (2017) 134–145.
13. S. Yan, A.M. Lomonosov, Z. Shen, Evaluation of an acoustic black hole's structural characteristics using laser-generated lamb waves, *Laser Phys. Lett.* 13 (2) (2016) 025003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Владимирович Попов, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198262, Санкт-Петербург, Ленинский пр., 101, e-mail: v.popof@mail.ru

Vladimir V. Popov, postgraduate student of Department of theoretical mechanics and resistance of materials, St. Petersburg state marine technical University, Leninskiy av., 101, St. Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: v.popof@mail.ru

Сергей Владиславович Сорокин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198262, Санкт-Петербург, Ленинский пр., 101, e-mail: sorokins@mail.ru

Sergey V. Sorokin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of theoretical mechanics and resistance of materials, St. Petersburg state marine technical University, Leninskiy av., 101, St. Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: sorokins@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 18.10.2022.

Научная статья

УДК 639.2.081

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.018>

Исследование процесса подъёма траловых мешков по слипам судов на модельной установке

Н.А. Скуратов¹ nikolaj.skuratov@klgtu.ru, Е.Е. Львова¹ ekaterina.lvova@klgtu.ru,
А.В. Суконнов¹ anatolij.sukonnov@klgtu.ru, Т.Е. Суконнова¹ tatyana.sukonnova@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Работа посвящена изучению физического процесса подъёма уловов от различных факторов. В ней описан порядок подготовки и проведения экспериментальных работ на изготовленной модельной установке, который позволяет приблизиться к реальным условиям эксплуатации орудий промышленного рыболовства, описана измерительная аппаратура и объекты исследований, которыми являются модели траловых мешков. Исследование позволяет оценить влияние рассматриваемых факторов и их сочетаний на формирование пиковых нагрузок, возникающих в вытяжном конце промысловых лебёдок и приводящих к травмам экипажа, повреждениям промыслового оборудования, снижениям качества уловов. В работе впервые была установлена взаимосвязь тягового усилия выборки траловых мешков с уловом от следующих факторов: угла наклона и формы поверхности слипового настила, скорости выборки, площади соприкосновения тралового мешка, и проведена оценка их значимости. По полученным результатам предложены рекомендации, которые позволят выбрать оптимальное соотношение влияющих факторов и в конечном итоге снизить тяговое усилие необходимое для поднятия уловов на палубу судна.

Ключевые слова: промысловое оборудование, трал, улов, слип, модель, эксперимент, факторы, пиковые нагрузки

Финансирование: Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

Для цитирования: Скуратов Н.А., Львова Е.Е., Суконнов А.В., Суконнова Т.Е. Исследование процесса подъёма траловых мешков по слипам судов на модельной установке, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 26—32.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.018>

Investigation of the process of lifting trawl bags on the slipway of the vessel on a model installation

Nikolai A. Skuratov¹ nikolaj.skuratov@klgtu.ru, Ekaterina E. Lvova¹ ekaterina.lvova@klgtu.ru,
Anatolii V. Sukonnov¹ anatolij.sukonnov@klgtu.ru, Tatyana E. Sukonnova¹ tatyana.sukonnova@klgtu.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the physical process of the lifting catches from various factors. It describes the procedure for preparing and conducting experimental work on a manufactured model installation, which allows you to get closer to the actual operating conditions of industrial fishing gear, describes the measuring equipment and research objects, which are models of trawl bags. The study makes it possible to assess the influence of the considered factors and their combinations on the formation of peak loads that occur in the haul end of fishing winches and lead to crew injuries, damage to fishing equipment, and reduction in the quality of catches. In the work, for the first time, the relationship between the traction force of hauling trawl bags and the catch from the following factors was established: the angle of inclination and the shape of the surface of the slip deck, the speed of hauling, the area of contact of the trawl bag, and an assessment of their significance was carried out. Based on the results obtained, recommendations are proposed that will allow you to choose the optimal ratio of influencing factors and ultimately reduce the traction force required to raise the catches on the deck of the vessel.

Key words: fishing equipment, trawl, catch, slip, model, experiment, factors, peak loads.

Financial Support: The study was carried out as part of the state assignment on the topic "Development of physical, mathematical and predictive models for the operation of bottom and mid-water trawl systems".

For citation: Nikolai A. Skuratov, Ekaterina E. Lvova, Anatolii V. Sukonnov, Tatyana E. Sukonnova, Investigation of the process of lifting trawl bags on the slipway of the vessel on a model installation, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 26—32.

Введение

Рыболовные суда тралового лова в большинстве своём работают слиповым методом, т. е. спуск,

подъём трала и улова осуществляется по слиповому настилу. Данный метод прост в использовании, в тоже время он имеет ряд негативных недостатков. Это его энерго- и трудоёмкость. Так же на практике замечено, что при подъёме траловых мешков с

уловом по слипам рыболовных судов возникают пиковые нагрузки, которые зачастую соизмеримы с максимальными тяговыми усилиями вытяжных промысловых лебёдок. Это обстоятельство приводит к перегрузкам промысловых механизмов, их повышенному износу и как следствие потери работоспособности, а также порыву элементов орудий рыболовства и потери качества улова.

Промысловиками принимались различные технические решения с целью решения данной проблемы. Это применение рол-гангов на слиповом настиле, смол, пенок и т.д. Однако по различным причинам решения не дали положительных результатов.

Вышеуказанная проблема не может быть решена в силу сложности и не изученности физики процесса движения тралового мешка с уловом по слипу судна. Выполненные ранее исследования по данному вопросу позволяли в некоторой степени оценить влияние факторов траловой системы на усилие выборки траловых мешков с уловом [1-4]. Однако из-за отсутствия соответствующей измерительного и вычислительного оборудования результат исследования не имеет успеха. Исследования по изучению физики процесса подъёма траловых мешков с уловом по слипу судна в промысловых условиях не представляется возможным из-за отсутствия силоизмерительного комплекса, регистрирующего усилие в динамике, а также невозможностью реализации влияющих на этот процесс факторов. Известно, что промысловые суда имеют различные: формы и размеры слипов, углы их установки, места установки вытяжных лебёдок и проводки вытяжных концов, степени заполненности траловых мешков [5-8]. С учётом вышеизложенного поставлена задача исследования данного процесса на физических моделях, а затем используя масштабные коэффициенты пересчитать на натурную систему рыболовное судно- промысловая машина-орудие лова.

В предыдущих исследованиях была установлена зависимость усилия выборки траловых мешков с

уловом от наклона слипа, угла выхода вытяжного конца и формы слипа [9-13]. В этих исследованиях не учитывается влияние формы траловых мешков и величины улова.

Как известно, что размеры орудий лова и траловых мешков постоянно увеличиваются, что объясняется экономическими составляющими промысловой деятельности судна.

В свою очередь не учёт факторов, характеризующих орудие лова не позволяет объективно оценивать выполненные ранее исследования.

Известно, что при большей площади соприкосновения поверхности тралового мешка с настилом слипа (вес улова на единицу площади соприкосновения) увеличивается коэффициент трения и тем самым увеличивается сила трения движения [14,15].

С учётом вышеизложенного было принято решение о проведении экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи между усилием выборки траловых мешков с уловом по слипам судов и факторами, характеризующими траловую систему рыболовное судно- промысловая машина-орудие лова.

Подготовка к проведению экспериментальных работ

Для проведения экспериментальных работ предложена методика, которая включает в себя: разработку и изготовление экспериментальной установки, объекта исследований, порядка проведения экспериментальных работ.

Действующий макет установки был изготовлен в масштабе 1:3,8 к базовой промысловой палубе судов типа МРТК. Установка позволяет имитировать физические процессы движения тралового мешка по слиповой поверхности.

Экспериментальная установка состоит из макета палубы, слипового устройства, вытяжной лебёдки, стойки с блоком. Схема установки представлена на рисунке 1.

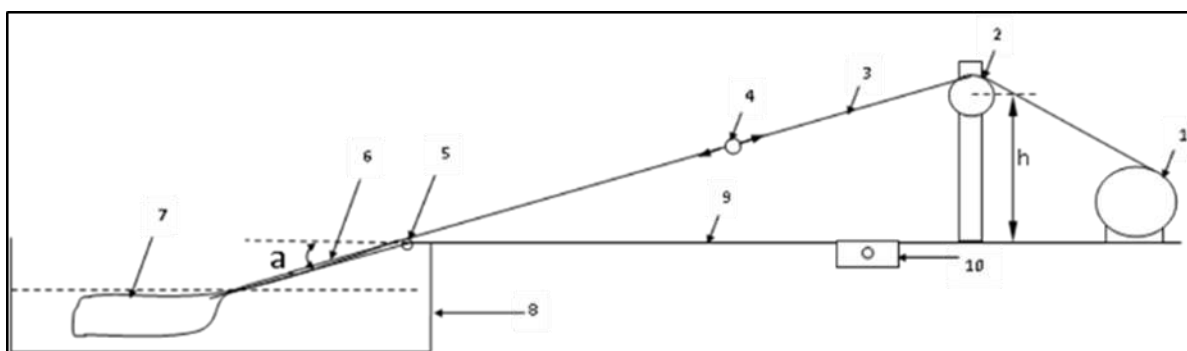


Рис. 1. Схема установки. 1-лебедка (кабельно-сетной барабан); 2- блок; 3- веревка (канатно-сетная часть); 4- оборудование Mic200; 5- слиповый ролл; 6-слип; 7-мешок с уловом; 8-ванна с водой; 9-палуба; 10-пульт; а- угол наклона слипа

Палуба макета была покрыта деревом, с целью обеспечения условий близких к натурным.

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны факторы, характеризующие систему судно- промысловая машина-орудие лова. К ним относятся:

- угол наклона слипа по отношению к промысловой палубе, диапазон его изменения составил 25°-40°
- форма слипового настила, диапазон: прямой – сферический
- скорость выборки траловых мешков, диапазон: 0,3 – 0,5 м/с

- площадь соприкосновения тралового мешка с настилом слипа, диапазон: 182 – 246 см²

Диапазоны факторов были установлены на основании ранее выполненных исследований и анализа траловых систем.

Ванна с водой имитирует водную поверхность, причём она установлена на специальных винтовых подъёмниках, что обеспечивает исследование процессов выборки моделей траловых мешков применительно к различным типам судов.

Были изготовлены слиповые устройства из стального листа соответствующие прямой и сферической формам поверхности, с возможностью крепления их на направляющее полотно. Подготовленные слипы с различными формами поверхностей выполнены из того же материала, что и на судах.

Для проведения экспериментальных работ была подготовлена серия моделей траловых мешков различной конфигурации, выполненных в масштабе 1:3,8, для судов типа МРТК. Изготавливались макеты траловых мешков цилиндрической формы с различной длиной окружности мешка, наполнялись полиамидными гранулами, которые соответствуют по плотности, плотности рыбы (воды).

Модели траловых мешков перед началом испытаний выдерживались в воде в течении суток в помещении лаборатории, для более точного моделирования сопротивления.

Модели траловых мешков различного диаметра и конструкции, заполнялись гранулами соответствующими плотности уловов, вес которых составил 1,9 кг.

Для проведения испытаний применялся силоизмерительный комплекс «Мис 200» который позволял нам замерять усилия возникающее в вытяжном конце подъёма модели тралового мешка с уловом и с фиксацией усилий на мониторе в виде динамограмм.

При проведении экспериментальных работ были отобраны факторы, характеризующие систему судно-трал-промысловая машина и установлены диапазоны их изменения:

1. Форма слипового настила: прямой и сферический.

2. Угол наклона слипа, изменяемый в диапазоне от 25 до 40 градусов.

3. Скорость выборки (0,3 м/с, 0,4 м/с, 0,5 м/с)

4. Площадь соприкосновения тралового мешка с поверхностью слипа от 246 см² до 182 см².

В соответствии со строками матрицы были проведены экспериментальные работы.

Экспериментальные работы выполнялись в 2 этапа. Первый этап экспериментальных исследований посвящён изучению физики процесса подъёма тралового мешка с уловом слиповым методом является установление зависимости усилия в вытяжном конце промысловой лебёдки от скорости выборки и формы траловых мешков. Поставленная задача объясняется тем, что на эксплуатируемых судах управляемыми факторами являются скорость выборки и форма траловых мешков (величина площади соприкосновения поверхностей слипа и тралового мешка).

Результаты экспериментальных данных по данному этапу представлены в таблице 1.

Таблица 1

Увеличение усилия выборки от увеличения скорости

Влияющие факторы	Скорость выборки м/с			Увеличение
	0,3	0,4	0,5	
1, прям, 25	30,006	30,577	33,342	10%
1, прям, 40	39,665	38,912	40,890	3%
1, сфер, 25	29,368	31,408	32,747	10%
1, сфер, 40	37,512	38,527	39,603	5%
2, прям, 25	32,568	32,106	33,247	2%
2, прям, 40	36,533	37,425	38,876	6%
2, сфер, 25	37,540	35,132	32,077	-17%
2, сфер, 40	40,354	41,892	43,615	7%

Примечание к таблице 1.

1 – мешок с наибольшей площадью соприкосновения, 2- мешок с наименьшей площадью соприкосновения.

Для наглядности изменения усилия в вытяжном конце промысловой лебёдки при выборке мешков с уловом были построены графические зависимости проведена их аппроксимация, показанные на рисунке 2.

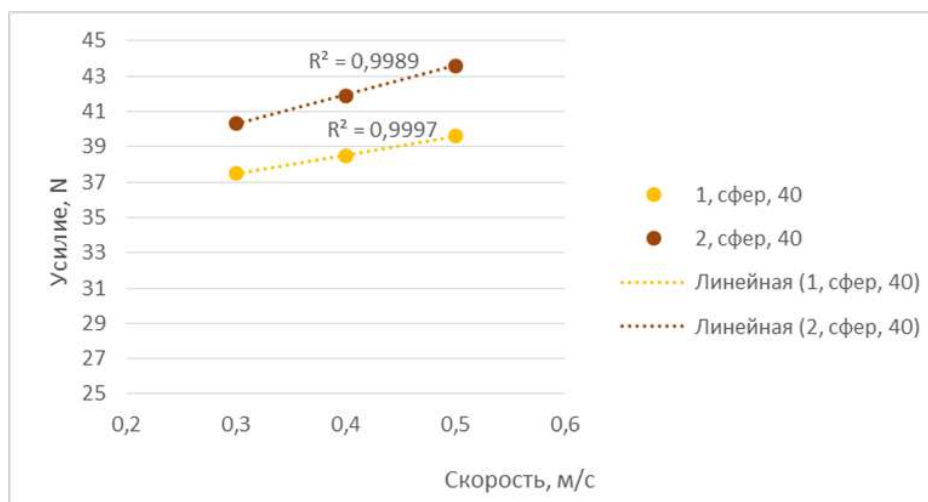


Рис. 2. Зависимости усилия выборки от скорости подъёма при угле наклона 40° (сферический слип) для мешков с различной площадью соприкосновения

Где 1 – мешок с большей площадью соприкосновения 2 – мешок с меньшей площадью соприкосновения.

Результаты экспериментов показали, что влияние величины площади соприкосновения мешка со слипом крайне неоднородно и при различных сочетаниях факторов, оказывает различное влияние (таблица 1).

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- при прямолинейной форме слиповой поверхности на углах наклона в 40 градусов наблюдается увеличение усилия на мешках с большей площадью соприкосновения в среднем на 3% при увеличении скорости на 40%, в то время как на сферических поверхностях рост составляет 5%. Аналогичное сочетание факторов, но с углом наклона в 25 градусов, приводит к росту усилия на 10% и для прямого и для сферического типа поверхностей;

- применение мешков с меньшей площадью соприкосновения на прямолинейных слиповых поверхностях с углами наклона в 40 градусов при увеличении скорости выборки на 40% приводит к увеличению усилия на 6%, в то время как на сферических слиповых поверхностях при прочих равных условиях усилие возрастает на 7%. Аналогичное сочетание факторов, но с углом наклона в 25 градусов, приводит к росту усилия на 2% для прямого, а для сферического типа поверхности к снижению усилия на 17%;

- увеличение угла наклона слипа с 25 до 40 градусов при применении мешков с большей площадью поверхности приводит к увеличению среднего усилия на 27% и 24% для прямого и сферического типа слиповой поверхности соответственно;

- увеличение же угла наклона слипа с 25 до 40 градусов при применении мешков с большей площадью поверхности приводит к увеличению среднего усилия на 15% и 21% для прямого и сферического типа слиповой поверхности соответственно;

- уменьшение площади соприкосновения мешка со слиповой поверхностью на 26% привело к увеличению усилия на прямом слипе с углом наклона в 25 градусов на 4% и к уменьшению при угле наклона в 40 градусов на 6%;

- уменьшение площади соприкосновения мешка со слиповой поверхностью на 26% привело к увеличению усилия на сферическом слипе на 13% и 9% с углами наклона в 25 и 40 градусов соответственно;

- смена сферической поверхности слипа на прямую приводит в среднем к увеличению усилия на 2%, для мешков с большей площадью соприкосновения, в то время как для мешков с меньшей площадью это значение составляет -8%, то есть наблюдается уменьшение усилия.

Подобную взаимозависимость одних факторов от других мы и наблюдаем в полученной нами зависимости.

Второй этап исследований охватывал влияние всех отобранных факторов на усилие выборки траловых мешков с уловом по слипу судна.

С целью сокращения времени проведения экспериментальных работ, а также возможности получения аналитических зависимостей усилия выборки траловых мешков с уловом на палубу судна был применён метод планирования эксперимента [16].

В частности, была составлена матрица четырёхфакторного эксперимента на двух уровнях (min – max) (таблица 2), т.е. необходимо было провести 16 прямых опытов с различным сочетанием факторов. Усилие выборки траловых мешков с уловом фиксировались в процессе его движения по слипу с помощью силоизмерительного комплекса «Mic 200». Силоизмерительный датчик тензометрического действия устанавливался в линию строп тралового мешка – вытяжной конец.

Усилия фиксировались на мониторе комплекса в цифровом виде и виде силовых динамограмм.

Эксперименты проводились в соответствии с строками матрицы по 10 раз, это обеспечивало точность экспериментальных данных с вероятностью 95%. Осредненные значения усилий в вытяжном конце заносились в таблицу для последующей математической обработки. После вычисления коэффициентов регрессии была получена математическая зависимость усилия в вытяжном конце промысловой лебёдки от исследуемых факторов.

Результаты исследований

Результатом экспериментальных работ явилась аналитическая зависимость усилия в вытяжном конце лебёдки от исследуемых факторов.

$$T = 36,122 - 0,481 \cdot x_1 + 3,51 \cdot x_2 + 0,678 \cdot x_3 + 0,73 \cdot x_4 - 0,159 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,27 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,065 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,437 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,516 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,576 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,493 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,435 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,383 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,862 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,39 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Где x_1 , x_2 , x_3 и x_4 – кодированные значения формы поверхности слипа, угла наклона слипа, скорости выборки и площади мешка соответственно.

Сопоставление расчётных значений, полученных по аналитической зависимости, с экспериментальными данными в среднем не превышает 10% (таблица 2).

Анализ полученной зависимости позволяет определить приоритет воздействия факторов на усилие в вытяжном конце при выборке траловых мешков с уловом на палубу судна. В частности, наибольшее влияние оказывает угол наклона слипа, вторым по значимости является форма траловых мешков, третьим скорость выборки и незначительное влияние оказывает форма слиповых настилов.

Таблица 2

Увеличение усилия выборки от увеличения скорости

N/N	Форма поверхности слипа (x_1)	Угол наклона слипа, α° (x_2)	Скорость выборки тралового мешка, v , м/с (x_3)	Площадь соприкосновения мешка со слиповой поверхностью (x_4)	Усилие в вытяжном конце T_{cp} , Н	Расчётное значение усилия в вытяжном конце	Погрешность, %
1.	Прямой (+)	25° (-)	0,3 м/с (-)	246 см ² (-)	30,007	30,724	2,334
2.	Прямой (+)	40° (+)	0,3 м/с (-)	246 см ² (-)	39,666	37,743	-5,094
3.	Сферический (-)	40° (+)	0,3 м/с (-)	246 см ² (-)	37,513	38,704	3,078
4.	Сферический (-)	25° (-)	0,3 м/с (-)	246 см ² (-)	29,368	31,685	7,311
5.	Прямой (+)	25° (-)	0,5 м/с (+)	246 см ² (-)	33,342	32,080	-3,934
6.	Прямой (+)	40° (+)	0,5 м/с (+)	246 см ² (-)	40,890	39,100	-4,580
7.	Сферический (-)	40° (+)	0,5 м/с (+)	246 см ² (-)	39,604	40,061	1,141
8.	Сферический (-)	25° (-)	0,5 м/с (+)	246 см ² (-)	32,747	33,041	0,880
9.	Прямой (+)	25° (-)	0,3 м/с (-)	182 см ² (+)	32,568	32,183	-1,196
10.	Прямой (+)	40° (+)	0,3 м/с (-)	182 см ² (+)	36,534	39,203	6,808
11.	Сферический (-)	40° (+)	0,3 м/с (-)	182 см ² (+)	40,355	40,164	-0,475
12.	Сферический (-)	25° (-)	0,3 м/с (-)	182 см ² (+)	37,540	33,144	-13,263
13.	Прямой (+)	25° (-)	0,5 м/с (+)	182 см ² (+)	33,247	33,540	0,871
14.	Прямой (+)	40° (+)	0,5 м/с (+)	182 см ² (+)	38,877	40,559	4,148
15.	Сферический (-)	40° (+)	0,5 м/с (+)	182 см ² (+)	43,616	41,520	-5,047
16.	Сферический (-)	25° (-)	0,5 м/с (+)	182 см ² (+)	32,077	34,501	7,025

Основные выводы

1. В большинстве случаев наименьшее усилие при выборке мешков возникает при использовании слипов с углами наклонов в 25 градусов для различных форм слипов.

2. Увеличение скорости выборки различно по своей силе и направлению, но в большинстве случаев приводит к увеличению усилия. Так увеличение скорости на 40% приводит к росту усилия от 2% до 10%, в зависимости от позиции других влияющих факторов.

3. Применение слипов со сферической формой рациональнее использовать совместно с мешками

обладающими большей площадью соприкосновения, в то время как на прямолинейных слиповых поверхностях наименьшее усилие возникает при выборке мешков с малыми площадями соприкосновения.

4. Применение мешков с малой площадью поверхности крайне сильно влияет на усилие, возникающее во время выхода мешка на порог слипа и зачастую во время проведения экспериментальных работ подобное усилие значительно превышало усилие, возникающее в момент, когда выбираемый мешок проходит через слиповую канавку.

Литература

1. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Экспериментальное исследование процесса подъема траловых мешков с уловом по слипу судна. // Известия КГТУ. – Калининград, 2019. - №54 – С. 187-195.
2. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Чеусов Н.А. Оценка способов подъема уловов на палубу судна для различных промысловых схем тралового лова // Сборник материалов X национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование» – Петропавловск-Камчатский: изд-во КамчатГТУ. – 2019.
3. Перспективная промысловая схема для судов пр. 1288 (Технические требования). – Л.: Гипрорыбфлот, 1999, 24 с.
4. Карпенко В.П., Торбан С.С. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства. М.: Агропромиздат, 1990. - 464 с.
5. Рябухин М.В. Промысловое оборудование для тралового и кошелькового лова // Промышленное рыболовство: Обзор. информ. ЦНИИТЭИРХ. 1983. Вып. 2. – 79 с
6. Гукало Я.М. О нагрузках в пространственных сетных фигурах и на модели трала // Труды Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства. – Т. 62. – Калининград: Изд-во КТИРПХ, 1977. – С. 109 – 115
7. Курапцев П.А. Особенности работы машин для выборки орудий лова // Труды НИКИМРП. – Т. IV. – Л.: Изд-во ВНИРО, 1968. – С. 45 – 62.
8. Зайчик, К.С. Промысловые устройства морских рыболовных судов. – Л.: Судостроение, 1972. - 232 с.

9. *Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Суконнова, Т.Е.* Экспериментальные исследования по оценке влияния скорости подъема траловых мешков с уловом по различным формам слипов судов на усилие в вытяжном конце промысловой лебёдки. // Известия КГТУ. – Калининград, 2020. - №57 – С. 67-76.
10. *Скуратов, Н.А. Суконнов, Суконнова, Т.Е., Быков А.А.* Экспериментальное определение зависимости усилия подъема траловых мешков с уловом от тягово-скоростных параметров промысловой лебёдки // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума 5-10 октября 2020 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», VIII Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – 1 электрон. опт. диск. – С. 277-282
11. *Скуратов, Н.А. Суконнов, Суконнова, Т.Е.* Теоретическая подготовка и обоснование экспериментальных работ по определению зависимости усилия подъема траловых мешков с уловом // Материалы IX Международного Балтийского морского форума 4-9 октября 2021 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», IX Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021. – С. 404-408
12. *Фридман, С.Л.* Взаимодействие трала и судна при подъеме улова на кормовом траулере: дис. канд. техн. наук / науч. рук.: А.И. Трещев – Мурманск: Мурман. высш. мореход. училище, 1960. – 242 с.
13. *Фридман, А.Л.* Исследование взаимодействия системы «судовая слиповая установка». – Калининград: КТИРПиХ, 1985. – 135 с.
14. *Полуляк С. И.* Исследование тяговых свойств рабочих органов неводоизборочных машин методом тензометрии // Рыбное хозяйство. – 1966, № 8. – С. 38 – 40.
15. *Полуляк С. И.* Методика исследования процессов трения элементов сетного полотна о рабочие поверхности неводоизборочных машин // Рыбное хозяйство. – 1975, № 12. – С. 42 – 48.
16. *Долин, Г. М.* Планирование экспериментов в промышленном рыболовстве: учеб. пособие – Калининград: Изд-во КГТУ, 1996. – 119 с.

References

1. Skuratov, N.A. Sukonnov, A.V. Eksperimental'noe issledovanie protsessa pod"ema tralovykh meshkov s ulovom po slipu sudna [Experimental study of the process of lifting trawl bags with a catch along the ship's slipway]. Kaliningrad, izd. Izvestiya KGTU, 2019, №54, S. 187-195.
2. Skuratov, N.A. Sukonnov, A.V. Cheusov N.A. Otsenka sposobov pod"ema ulovov na palubu sudna dlya razlichnykh promyslovykh skhem tralovogo lova [Evaluation of methods for lifting catches to the deck of a vessel for various commercial trawl schemes]. Petropavlovsk-Kamchatskii, Sbornik materialov X natsional'noi (vserossiiskoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii «Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie», izd. KamchatGTU, 2019.
3. Perspektivnaya promyslovaya skhema dlya sudov pr. 1288 (Tekhnicheskie trebovaniya) [Perspective fishing scheme for vessels pr. 1288 (Technical requirements)]. L., izd. Giproybflot, 1999, 24 s.
4. Karpenko V.P., Torban S.S. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya protsessov promyshlennogo rybolovstva [Mechanization and automation of industrial fishing processes]. M., izd. Agropromizdat, 1990, 464 s.
5. Ryabukhin M.V. Promyslovoe oborudovanie dlya tralovogo i koshel'kovogo lova [Fishing equipment for trawl and purse fishing] // Promyshlennoe rybolovstvo: Obzor. inform. izd. TsNIITEIRKh, 1983, Vyp. 2, 79 s.
6. Gukalo Ya.M. O nagruzkakh v prostranstvennykh setnykh figurakh i na modeli trala [On loads in spatial net figures and on the trawl model]. Kaliningrad, Trudy Kaliningradskogo tekhnicheskogo instituta rybnoi promyshlennosti i khozyaistva, izd. KTIIRPKh, T. 62, 1977, S. 109 – 115
7. Kuraptsev P.A. Osobennosti raboty mashin dlya vyboriki orudii lova [Features of the operation of machines for the selection of fishing gear]. L., Izd-vo VNIRO, Trudy NIKIMRP, T. IV., 1968, S. 45 – 62.
8. Zaichik, K.S. Promyslovyye ustroystva morskikh rybolovnykh sudov [Fishing devices of sea fishing vessels]. L., izd. Sudostroenie, 1972, 232 s.
9. Skuratov, N.A. Sukonnov, A.V. Sуконнова, Т.Е. Eksperimental'nye issledovaniya po otsenke vliyaniya skorosti pod"ema tralovykh meshkov s ulovom po razlichnym formam slipov sudov na usilie v vytyazhnom kontse promyslovoi lebedki [Experimental studies to assess the effect of the lifting speed of trawl bags with a catch according to various forms of ship slipways on the force in the pull end of a fishing winch]. Kaliningrad, Izvestiya KGTU, 2020, №57, S. 67-76.
10. Skuratov, N.A. Sukonnov, Sуконнова, Т.Е., Быков А.А. Eksperimental'noe opredelenie zavisimosti usiliya pod"ema tralovykh meshkov s ulovom ot tyagovo-skorostnykh parametrov promyslovoi lebedki [Experimental determination of the dependence of the lifting force of trawl bags with a catch on the traction and speed parameters of a fishing winch]. Kaliningrad, Materialy VIII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma 5-10 oktyabrya 2020 goda [Elektronnyi resurs]: v 6 tomakh. T. 2. «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoi industrii», VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Elektron. dan., izd. BGARF FGBOU VO «KGTU», 2020., 1 elektron. opt. disk., S. 277-282
11. Skuratov, N.A. Sukonnov, Sуконнова, Т.Е. Teoreticheskaya podgotovka i obosnovanie eksperimental'nykh rabot po opredeleniyu zavisimosti usiliya pod"ema tralovykh meshkov s ulovom [Theoretical preparation and substantiation of experimental work to determine the dependence of the lifting force of trawl bags with a catch]. Kaliningrad, Materialy IX Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma 4-9 oktyabrya 2021 goda [Elektronnyi resurs]: v 6 tomakh. T. 2. «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoi industrii», IX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, Elektron. dan., izd. BGARF FGBOU VO «KGTU», 2021, S. 404-408

12. Fridman, S.L. Vzaimodeistvie trala i sudna pri pod"eme ulova na kormovom traulere [The interaction of the trawl and the vessel when lifting the catch on the stern trawler]. Murmansk, izd. Murman. vyssh. morekhod. uchilishche, Dis. kand. tekhn. nauk, 1960, 242 s.
13. Fridman, A.L. Issledovanie vzaimodeistviya sistemy «sudovaya slipovaya ustanovka» [Study of the interaction of the "ship slip installation" system], Kaliningrad, izd. KTIRPiKh, 1985, 135 s.
14. Polulyak S. I. Issledovanie tyagovykh svoystv rabochikh organov nevodovыborochnykh mashin metodom tenzometrii [Investigation of the traction properties of the working bodies of non-water sampling machines using the strain gauge method]. M., izd. Rybnoe khozyaistvo, 1966, № 8, S. 38 – 40.
15. Polulyak S. I. Metodika issledovaniya protsessov treniya elementov setnogo polotna o rabochie poverkhnosti nevodovыborochnykh mashin [Technique for Investigation of the Processes of Friction of Mesh Fabric Elements on the Working Surfaces of Non-Water Sampling Machines]. M., izd. Rybnoe khozyaistvo, 1975, № 12, S. 42 – 48.
16. Dolin.G. M. Planirovanie eksperimentov v promyshlennom rybolovstve [Planning experiments in industrial fisheries]. Kaliningrad, ucheb. posobie, izd. KGTU, 1996, 119 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Александрович Скуратов, инженер кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nikolaj.skuratov@klgtu.ru

Nikolai A. Skuratov, engineer of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nikolaj.skuratov@klgtu.ru

Екатерина Евгеньевна Львова, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

Ekaterina E. Lvova, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

Анатолий Владимирович Суконнов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: anatolij.sukonnov@klgtu.ru

Anatolii V. Sukonnov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: anatolij.sukonnov@klgtu.ru

Татьяна Евгеньевна Суконнова, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский прт, 1, e-mail: tatyana.sukonnova@klgtu.ru

Tatyana E. Sukonnova, assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Prospect, 1, e-mail: tatyana.sukonnova@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2022.

Научная статья

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.019>

Экспериментальные исследования эффективности УФ-облучения для систем приточной вентиляции судовых помещений

Д.С. Мизгирев¹ mizgirevds@yandex.ru, М.А. Борисов¹ borisovmihail2011@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта,

Аннотация Воздушная среда является благоприятной для размножения микроорганизмов и вирусов. Проблема приобрела особую актуальность в связи с пандемией коронавируса Cov19, что, несомненно, сказалось на эксплуатации всех видов флота. Потребность в скрытой установке устройства обеззараживания воздуха обусловлена требованиями безопасности при эксплуатации судна. Используемые в настоящее время рециркуляторы не являются элементами судовых систем вентиляции. В статье предложена модернизация данной системы с использованием интегрированной установки обеззараживания воздуха. Предложена принципиальная схема такой установки. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий определить эффективность обеззараживания воздуха путем исследования микробной обсемененности. Планирование и обработка результатов эксперимента выполнены с помощью программного продукта. Разработана математическая модель работы установки обеззараживания приточного воздуха в системе вентиляции судовых помещений, обеспечивающей необходимую эффективность при минимальных энергетических и тепловых затратах на обработку воздуха.

Ключевые слова: Обеззараживание воздуха, УФ-лампа, вентиляция помещений судов, кондиционирование воздуха, приточная вентиляция, очистка воздуха, рециркуляция воздуха, математическая модель системы вентиляции судовых помещений.

Для цитирования: Мизгирев Д.С., Борисов М.А. Экспериментальные исследования эффективности УФ-облучения для систем приточной вентиляции судовых помещений, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 33—39.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.019>

Experimental studies of the effectiveness of UV irradiation for supply ventilation systems of ship premises

Dmitry S. Mizgirev¹ mizgirevds@yandex.ru, Mikhail A. Borisov¹ borisovmihail2011@mail.ru

¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation, Nizhny Novgorod

Abstract. The air environment is favorable for the reproduction of microorganisms and viruses. The problem has become particularly urgent in connection with the Cov19 coronavirus pandemic, which undoubtedly affected the operation of all types of fleet. The need for a concealed installation of an air disinfection device is due to safety requirements during the operation of the vessel. The recirculators currently in use are not elements of shipboard ventilation systems. The article proposes the modernization of this system using an integrated air disinfection unit. A schematic diagram of such an installation is proposed. An experimental stand has been developed to determine the effectiveness of air disinfection by studying microbial contamination. The planning and processing of the experiment results were carried out using a software product. A mathematical model has been developed for the operation of the supply air disinfection unit in the ship's ventilation system, which provides the necessary efficiency with minimal energy and heat costs for air treatment.

Keywords: air disinfection, UV lamp, ventilation of ship premises, air conditioning, supply ventilation, air purification, air recirculation, mathematical model of the ventilation system of ship premises.

For citation: Dmitry S. Mizgirev, Mikhail A. Borisov, Experimental studies of the effectiveness of uv irradiation for supply ventilation systems of ship premises, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 33—39.

Введение

Воздух судовых помещений является приоритетной составляющей в обеспечении условий обитаемости экипажа и пассажиров судов. В то же время воздушная среда является благоприятной для размножения микроорганизмов и вирусов. Проблема приобрела особую актуальность в связи с пандемией коронавируса Cov19, что, несомненно, сказалось на эксплуатации всех видов флота.

Для уничтожения вегетативных и спорообразующих видов бактерий, вирусов,

водорослей и многих других видов микроорганизмов применяется эффект ультрафиолетового облучения (УФИ), обусловленный фотохимическими реакциями, в результате которых наносятся необратимые повреждения ДНК, РНК и клеточным мембранам микроорганизмов, приводящими к их гибели. Установки обеззараживания воздуха на базе УФИ в настоящее время широко применяются в медицинских целях, в быту и на производстве. В большинстве случаев это переносные установки, расположенные непосредственно внутри помещения и действующие по принципу рециркуляции

обрабатываемого воздуха. Основными достоинствами такого оборудования являются простота и минимальные затраты при эксплуатации. Однако на судах в условиях ограниченного пространства, применение дополнительных устройств обеззараживания воздуха размещённых на стенах или полу помещения является неприемлемым не только с точки зрения сохранения дизайна, но и необходимости обеспечения минимальной ширины проходов вокруг установленного оборудования и на путях эвакуации. Таким образом возникает потребность в скрытой установке устройства, однако данного предложения пока нет на рынке. При этом решение проблемы лежит на поверхности т.к. достаточно рециркулирующую установку поместить внутри существующего вентиляционного канала обслуживаемого помещения, что требует дополнительных исследований (теоретических и экспериментальных).

Описание эксперимента

Базовые уравнения, описывающие технологию обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучателем (УФИ) при нормальных условиях в помещении, описываются следующими выражениями.

Расход воздуха приточной вентиляции определяется по формуле, м³/ч:

$$P_{pv} = V/t_3 = V \cdot K_p, \quad (1)$$

где: V – строительный объем помещения, м³;

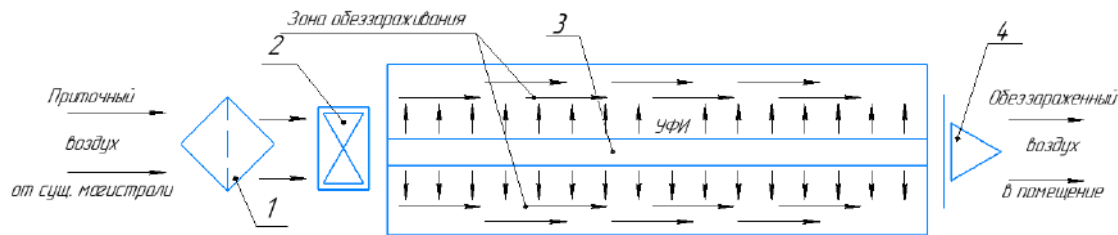


Рис. 1. Установка обеззараживания приточного воздуха в системе вентиляции помещения: 1-фильтр; 2 – вентилятор; 3 – УФИ; 4 – дефлектор приточной вентиляции помещения

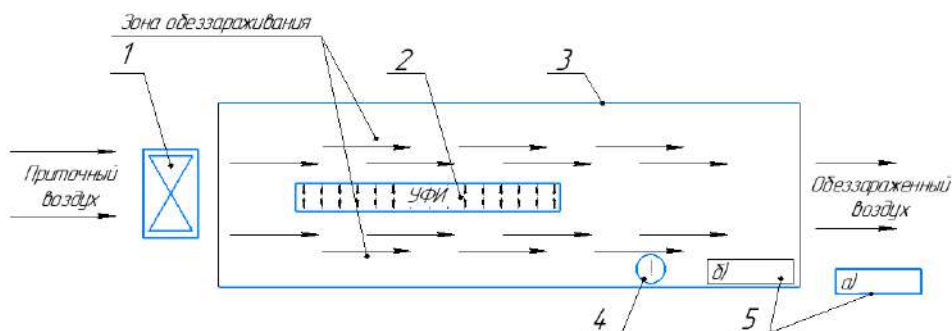


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – вентилятор; 2 – УФИ; 3 – вентиляционный канал; 4 – датчик измерителя влажности и температуры; 5 – чашка Петри (а – с наружи канала вентиляционного; б – внутри канала вентиляционного, перед выходом)

Для проверки работоспособности предлагаемой технологии был создан экспериментальный стенд, принципиальная схема и внешний вид которого представлены на рис. 2, 3.

K_p – кратность воздухообмена в помещении;
 t_3 – длительность эффективного облучения, ч.

Количество источников УФИ, шт:

$$N_l = (P_{pv} \cdot N_v \cdot K_3) / (\Phi_{б.л.} \cdot K_{\phi} \cdot 3600) \quad (2)$$

где: N_v – бактерицидная доза, Дж/м³, выбирается согласно заданному значению бактерицидной эффективности $J_{бк}$ (табл.3 [1]);

N_l – количество ламп в установке обеззараживания, шт;

$\Phi_{б.л.}$ – бактерицидный поток лампы, Вт;

K_{ϕ} – коэффициент использования бактерицидного потока лампы;

P_{pv} – производительность приточно-вытяжной вентиляции, м³/ч;

K_3 – коэффициент запаса.

Преобразуя выражение (2) получаем необходимый бактерицидный поток лампы, Вт:

$$\Phi_{б.л.} = (P_{pv} \cdot N_v \cdot K_3) / (N_l \cdot K_{\phi} \cdot 3600) \quad (3)$$

Таким образом, зная объем помещения и, как следствие, производительность системы вентиляции, можно определить мощность и количество бактерицидных ламп необходимых для обеззараживания воздуха.

Схема установки обеззараживания приточного воздуха изображена на рис. 1.

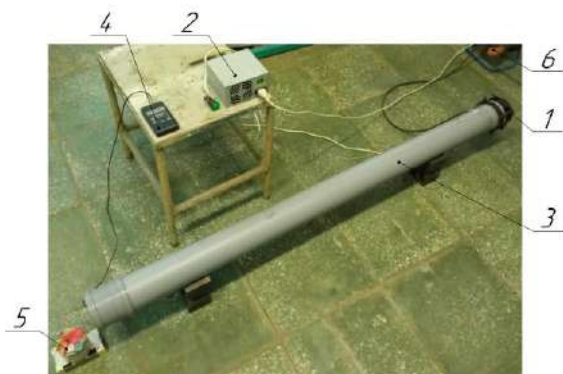


Рис. 3. Внешний вид стенда: 1 – вентилятор; 2 – блок питания УФИ; 3 – вентиляционный канал; 4 – измеритель влажности и температуры; 5 – чашка Петри; 6 – источник питания 220В

Предварительные расчеты системы для изготовленного устройства обеззараживания воздуха, подбор источника компримированного воздуха, УФИ и прочего необходимого оборудования стенда был выполнен по уравнениям (1-3), с учетом рекомендаций источников [1-5,13-14].

Таблица 1

Перечень оборудования применяемого на стенде

Оборудование	Наименование, тип	Технические характеристики
Источник компримированного воздуха	Вентилятор ВВФ-112М	N=20Вт, Q=120м³/ч, H=4,6кгс/м².
УФИ	Philips TUV 30W/G30T8 [2]	Φ _{бк.л.} =11,2Вт N = 30Вт
	Philips TUV 55W HO G55 T8 [2]	Φ _{бк.л.} =16,5Вт N = 55Вт
Корпус обеззараживателя	Труба ПП-Г 110x2,7 ГОСТ 32414-2013	Ду 110мм
	Труба ПП-Г 63x1,8 ГОСТ 32414-2013	Ду 63мм
Чашка Петри	Чашка ЧБН-2 ГОСТ 25336-82	D=100мм

Стенд состоит из УФ лампы, встроенной в полипропиленовую трубу (имитирующую воздухопровод системы вентиляции) и канального вентилятора, подающего воздух в установку. На выходе из канала осуществляется отбор проб микробной обсемененности, здесь же производится замер расхода воздуха анемометром крыльчатый. Подробный перечень примененного оборудования отражен в табл. 1, контрольно-измерительных приборов - в табл. 2.

Таблица 2

Перечень контрольно-измерительных приборов

Средства измерения	Тип	Класс точности	Предел измерения
Гигрометр	ВИТ-1	-	(+5...+25) °С (20...90) %
Анемометр ручной крыльчатый	АСО-3	-	(0,3...5,0) м/с
Измеритель влажности и температуры	ИВТМ-7М	0,2	(0...99) % (-45...+60) °С
Секундомер механический	СОПр-2а-2-010	2	(0...3600) сек.

Средства измерения	Тип	Класс точности	Предел измерения
Измеритель концентрации озона	ИКО-01	1	(0...30)мг/л
Ротаметр	РМ-А-0,063Г Уз	4,0	(0,0126...0,063) м³/ч
Мановакууметр	МВП1,5-У	1,5	(0...4) кгс/см²

В связи с тем, что в процессе эксперимента отсутствует техническая возможность варьирования мощности УФИ, производилась их замена согласно табл.1. Расход воздуха через экспериментальный стенд изменялся заслонкой с целью обеспечения необходимой бактерицидной эффективности и подобран согласно источникам [1-5].

Технические параметры стенда в ходе проведения опытов поддерживались на уровне, полученном при его наладке перед испытаниями.

Анализируя статистические данные [2,3] расход воздуха в системах вентиляции судовых помещений находится в пределах (33...180) м³/ч. Ограничением здесь является техническое задание заказчика при постройке или модернизации судна, о необходимости оборудования конкретного помещения под определенное количество людей.

Для подтверждения отсутствия масштабного эффекта необходимо провести стендовые испытания установки обеззараживания при максимальной и минимальной производительности. Принимаем за максимум при испытаниях расход воздуха 80м³/ч.

В процессе проведения опытов на стенде обеспечено варьирование факторов указанных в таблице 3 пределах.

Таблица 3

Варьируемые факторы и пределы их изменения

№ п.п.	Фактор	Обозначение	Предел изменения
1	Расход воздуха	П _{рв}	33; 80 м³/ч
2	Бактерицидный поток лампы	Φ _{бк.л.}	11,2; 16,5 Вт
3	Условный проход в облучателе	Д _у	63; 110 мм

Пределы варьирования факторов 1,2,3 назначены по результатам анализа источников [1...5], а также исходя из результатов предварительных экспериментальных исследований авторов.

Настройка стенда и исследование его работы выполнены в лаборатории металлорежущего оборудования ФГБОУ ВО «ВГУВТ».

Испытания проводились при температуре воздуха в помещении T₀=18°С. Взятые пробы микробной обсемененности воздуха помещения перед запуском стенда и после.

Из табл. 3 следует, что для всех факторов интервалы возможного варьирования невелики, поэтому можно предположить, что в области определения зависимости величин n (кол-во колоний на 1м³) (y_i=f(x_i)[n]) от факторов не будут противоречить линейным, а распределения этих величин - нормальному закону, что будет рассмотрено в дальнейшем. Тогда искомые функции можно представить в виде рядов Тейлора:

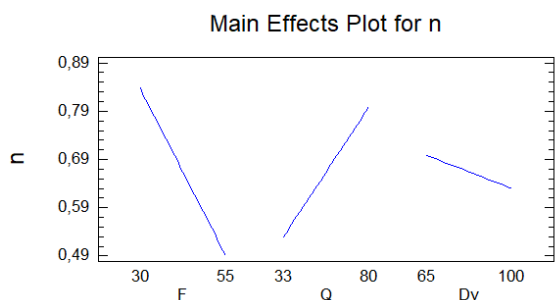


Рис. 8. – График влияния основных факторов

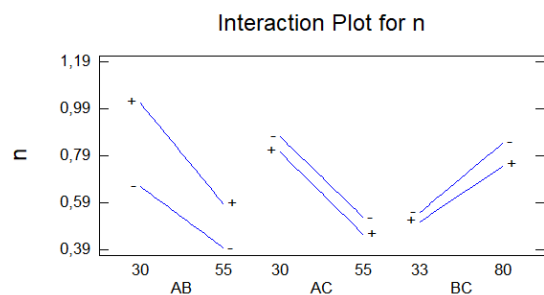


Рис. 9. – График влияния взаимодействия факторов

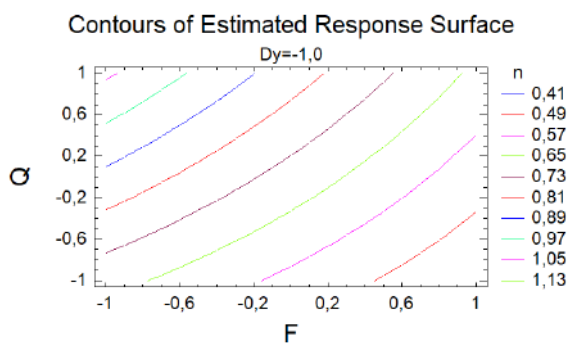


Рис. 10 - Контуры расчетной поверхности отклика

В результате обработки результатов эксперимента получено регрессионное уравнение:

$$n = 0,664074 - 0,173981 \cdot \Phi_{\text{бк.л}} + 0,135 \cdot P_{\text{рв}} - 0,0346295 \cdot D_y - 0,0421296 \cdot \Phi_{\text{бк.л}} \cdot P_{\text{рв}} - 0,00138887 \cdot \Phi_{\text{бк.л}} \cdot D_y - 0,0144444 \cdot P_{\text{рв}} \cdot D_y \quad (5)$$

Достоверность полученной модели оценивалась сравнением различных описывающих ее уравнений. Критерием достоверности выступало значение коэффициента детерминации R^2 . Представлен вариант уравнения, описывающего изменение исследуемой переменной с наименьшей степенью отклонения теоретических значений от экспериментальных. Об этом говорит значение теста (P-Value) и наибольшее значение критерия Фишера (F-Ratio). Самый малый вклад в расчетное значение количества колоний микроорганизмов n в данной модели вносит произведение мощности лампы и условного диаметра трубопровода – взаимодействие AC (F, D_y). Это подтверждено анализом карт Парето, представленных на рис.5, соответствующий блок не пересекает вертикальную линию, представляющую 95% тест для определения значимости.

После исключения несущественного взаимодействия выражение (5) примет вид, шт/м³:

$$n = 0,664074 - 0,173981 \cdot \Phi_{\text{бк.л}} + 0,135 \cdot P_{\text{рв}} - 0,0346295 \cdot D_y - 0,0421296 \cdot \Phi_{\text{бк.л}} \cdot P_{\text{рв}} - 0,0144444 \cdot P_{\text{рв}} \cdot D_y \quad (6)$$

Оптимумы геометрических и режимных характеристик, определенные экспериментом, а также адекватность моделей приведены в табл.5.

Таблица 5

Оптимальные геометрические и режимные характеристики установки обеззараживания.

Параметр оптимизации	Значение параметра, шт/м ³	$\Phi_{\text{бк.л}}$, Вт	$P_{\text{рв}}$, М ² /ч	D_y , мм	R^2 , %
Минимизация n	0,347778	16,5	33	110	99,66

Согласно требованиям нормативной документации [1] количество колоний микроорганизмов при котором уровень микробной обсемененности воздуха считается допустимым составляет не более 3.

Работу системы содержащей УФИ описывают также следующие выражения:

Уравнение теплового баланса помещений судов, оборудованных системами вентиляции и кондиционирования воздуха, Вт:

$$\sum Q_{\text{явн}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{ост}} + Q_{\text{нд}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{л}}^{\text{явн}} + Q_{\text{оп}}^{\text{явн}} + Q_{\text{п}}^{\text{явн}} + Q_{\text{т}} = Q_{\text{конд}} \quad (7)$$

где $\sum Q_{\text{явн}}$ – суммарный явный тепловой поток, Вт;

$Q_{\text{ог}}$ – тепловой поток через ограждающие поверхности, Вт;

$Q_{\text{с}}$ – тепловой поток от солнечной радиации, Вт;

$Q_{\text{ост}}$ – тепловой поток от солнечной радиации, поступающий через остекление, Вт;

$Q_{\text{нд}}$ – тепловой поток от солнечной радиации, поступающий через иллюминаторы, Вт;

$Q_{\text{осв}}$ – тепловой поток, вносимый искусственным освещением, Вт;

$Q_{\text{пр}}$ – тепловой поток от находящихся в помещении электрических аппаратов, приборов и оборудования, Вт;

$Q_{\text{л}}^{\text{явн}}$ – явный тепловой поток, выделяемый людьми, Вт;

$Q_{\text{оп}}^{\text{явн}}$ – явный тепловой поток, выделяемый остывающей пищей, Вт;

$Q_{\text{п}}^{\text{явн}}$ – явный тепловой поток, вносимый в помещение перегретым паром, Вт;

$Q_{\text{т}}$ – тепловой поток, вносимый горячими поверхностями оборудования и трубопроводов, Вт.

Уравнение энергетического баланса движения газообразных сред состоит из уравнений, потребных напоров вентилятора на i -том участке (8), м; и обобщенного сопротивления трубопроводов на i -том участке системы (9), с²/м⁵:

$$H_{\text{гi}}^{\Pi} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_{\text{г}} \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{\text{гi}} \cdot Q_{\text{гi}}^2) + J_i \quad (8)$$

где Δp_i – перепад давления на i -том участке, Па;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³;

$R_{\text{гi}}$ – обобщенное сопротивление газопроводов на i -том участке системы, с²/м⁵;

$Q_{гi}$ - объемные скорости газа на i -том участке, м³/с;

J_i - инерционный член, учитывающий потери напора вследствие нестационарности движения воздуха на i -том участке (определяется конструкцией элемента и режимом течения, по формуле [11]), Па.

$$R_i = \left(\lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{i=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g'} \quad (9)$$

где λ_i – коэффициент сопротивления трения на i -том участке трубопровода. Определяется по справочникам [11, 12];

D_i – диаметр трубопровода на i -том участке, м;

$\sum \xi_{ij}$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений на i -том участке трубопровода. Определяется по справочникам [11,12].

Уравнение материального баланса в помещении, м³/ч:

$$P_{пр} = P_{выт} \quad (10)$$

где $P_{выт}$ – производительность вытяжной системы вентиляции, м³/ч.

Необходимая площадь сечения воздушного канала системы вентиляции, м²:

$$F = \frac{P_{пр}}{3600 \cdot v}; \quad (11)$$

где: v - скорость движения воздуха, м/с, при условиях:

$4 < v < 10$ м/с - для ответвлений;

$v < 15$ м/с - для магистралей;

$0,1 < v < 0,4$ м/с - для судовых помещений, в зависимости от назначения.

После подстановки оптимальных геометрических и режимных параметров установки обеззараживания (табл.5) в выражения (1...4, 6) и их преобразований

получим систему уравнений описывающую математическую модель работы установки обеззараживания воздуха.

$$P_{пр} = \frac{V}{t_3} = V \cdot K_p;$$

$$\Phi_{бк.л.} = \frac{P_{пр} \cdot H_v \cdot K_3}{N_d \cdot K_{\phi} \cdot 3600};$$

$$n = 0,664074 - 0,173981 \cdot F + 0,135 \cdot P_{пр} - 0,0346296 \cdot D_y - 0,0421296 \cdot F \cdot P_{пр} - 0,0144444 \cdot P_{пр} \cdot D_y < 3$$

$$F = \frac{P_{пр}}{3600 \cdot v};$$

$$P_{пр} = P_{выт}$$

$$\sum Q_{явн} = Q_{ог} + Q_c + Q_{ост} + Q_{нд} + Q_{осв} + Q_{пр} + Q_{л}^{явн} + Q_{оп}^{явн} + Q_{п}^{явн} + Q_{т} = Q_{конд}$$

$$H_{гi}^{\Pi} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_i \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{гi} \cdot Q_{гi}^2) + J_i \quad R_i = \left(\lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{i=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g'}$$

Заключение

В результате выполнения эксперимента и обработки его результатов получена математическая модель установки обеззараживания воздуха в системе приточной вентиляции, обеспечивающей необходимую эффективность при минимальных энергетических и тепловых затратах на обработку воздуха. Внедрение предлагаемого оборудования особенно актуально в настоящее время и обеспечит необходимый уровень безопасности для судовых экипажей и пассажиров. Дальнейшим развитием данной работы будет являться создание научно обоснованной методики и алгоритма проектирования обозначенной установки.

Литература

1. Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях. Руководство: Р 3.5.1904-04. – М.: Минздрав России, 2005г. 27с.
2. Суда внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.5.2-703-98. М.: Минздрав России, 1998. 144 с.
3. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры. Санитарно-эпидемиологические правила: СП 2.5.3650-20. - Главный государственный санитарный врач РФ. Постановление от 16 октября 2020 года N 30 Об утверждении санитарных правил СП 2.5.3650-20. Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/566406892?section=text>.
4. Российский речной регистр. Правила. I – IV тома. Москва 2019г с редакцией от 2022г.
5. Паспорт и руководство по применению специальных люминесцентных дезинфекционных ламп TUV. Philips. 4с.
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. 280 с.: ил.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. Для инженеров и студентов ВТУЗов. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1969. 368 с.: ил.
8. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах. В. Дюк; пер. с англ. – СПб.: Питер, 1997. 240 с.: ил.
9. Чиняев И.А. Судовые системы: учебник для ВУЗов. И.А. Чиняев. 3-е изд., перераб. и доп. М.:Транспорт, 1984. 216 с.: ил
10. Гагаев С. Ю. Проблемы и перспективы развития внутреннего водного транспорта в Российской Федерации. Научный взгляд в будущее. 2016. Т. 1. №. 2. С. 46-50.
11. Альтшуль В.Д., Киселев П.Г. Гидродинамика и аэродинамика: учеб. пособие для ВУЗов. В.Д. Альтшуль, П.Г.Киселев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1975. – 323с.: ил

12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. И.Е. Идельчик. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.: ил.
13. Milad Raeiszadeh, Babak Adeli. A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. ACS Photonics 2020, 7, 11, 2941–2951 Publication Date: October 14, 2020 Режим доступа: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.0c01245> Copyright © 2020 American Chemical Society
14. Shelly L. Miller, Jacqueline Linnes, Julia Luongo. Ultraviolet Germicidal Irradiation: Future Directions for Air Disinfection and Building Applications. Volume 89, Issue 4. Special Issue: Symposium in Print on Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. July/August 2013 Pages 777-781. Режим доступа <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/php.12080>

References

1. Ispol'zovanie ul'traioletovogo bakteritsidnogo izlucheniya dlya obezrazhivaniya vozdukh v pomeshcheniyakh [The use of ultraviolet bactericidal radiation for disinfection of indoor air]. Rukovodstvo: R 3.5.1904-04. – М.: Minzdrav Rossii, 2005g. – 27s.
2. Suda vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya [Vessels of internal and mixed (river-sea) navigation]. Sanitarnye pravila i normy: SanPiN 2.5.2-703-98. – М.: Minzdrav Rossii, 1998. – 144 s.
3. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob'ektam transportnoy infrastruktury [Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities]. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila: SP 2.5.3650-20. - Glavnyy gosudarstvennyy sanitarnyy vrach RF. Postanovlenie ot 16 oktyabrya 2020 goda N 30 Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil SP 2.5.3650-20. Rezhim dostupa <https://docs.cntd.ru/document/566406892?section=text>.
4. Rossiyskiy rechnoy registr [Russian River Register]. Pravila. I – IV toma. Moskva 2019g s redaktsiyey ot 2022g.
5. Pasport i rukovodstvo po primeneniyu spetsial'nykh lyuminescentnykh dezinfektsionnykh lamp TUV [Passport and guide for the use of special fluorescent disinfection lamps TUV]. Philips. – 4с.
6. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Experiment planning while searching for optimal conditions]. Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovskiy. – М.: Nauka, 1976. – 280 s.: il.
7. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Dlya inzhenerov i studentov VTUZov. E.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – М.: Nauka, 1969. – 368 s.: il.
8. Dyuk V. Obrabotka dannykh na PK v primerakh [Data processing on a PC in examples]. V. Dyuk; per. s angl. – SPb.: Piter, 1997. – 240 s.: il.
9. Chinyaev I.A. Sudovye sistemy [Ship systems]: uchebnyk dlya VUZov / I.A. Chinyaev. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Transport, 1984. – 216 s.: il
10. Gagaev S. Yu. Problemy i perspektivy razvitiya vnutrennego vodnogo transporta v rossiyskoy federatsii [Problems and prospects of development of inland water transport in the Russian Federation] //Nauchnyy vzglyad v budushchee. – 2016. – T. 1. – №. 2. – S. 46-50.
11. Al'tshul' V.D., Kiselev P.G. Gidrodinamika i aerodinamika [Hydrodynamics and aerodynamics]: ucheb. posobie dlya VUZov / V.D. Al'tshul', P.G. Kiselev. – 2-e izd., pererab. i dop. – М.: Stroyizdat, 1975. – 323s.: il
12. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic Resistances]. I.E. Idel'chik – М.: Mashinostroenie, 1992. – 672 s.: il
13. Milad Raeiszadeh, Babak Adeli. A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. ACS Photonics 2020, 7, 11, 2941–2951 Publication Date: October 14, 2020 Режим доступа: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.0c01245> Copyright © 2020 American Chemical Society
14. Shelly L. Miller, Jacqueline Linnes, Julia Luongo. Ultraviolet Germicidal Irradiation: Future Directions for Air Disinfection and Building Applications. Volume 89, Issue 4. Special Issue: Symposium in Print on Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. July/August 2013 Pages 777-781. Режим доступа <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/php.12080>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Сергеевич Мизгирев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемнотранспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Михаил Александрович Борисов, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: borisovmihail2011@mail.ru

Dmitry S. Mizgirev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine Repair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Mikhail A. Borisov, Dr. Sci. (Eng.), Graduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine Repair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: borisovmihail2011@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.00.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 07.12.2022.

Научная статья

УДК 629.5.06

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.020>

Совершенствование судовых станций приготовления питьевой воды с использованием синергетического эффекта активированных окислительных технологий

Д.С. Мизгирев¹ mizgirevds@yandex.ru, Н.М. Гурьянов¹ gurianov.nm@vsuwt.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье рассмотрены особенности применения активированных окислительных технологий в судовых станциях приготовления питьевой воды. Рассмотрены процессы обеззараживания питьевой воды с использованием кавитации, УФ-излучения, озонирования. Показано, что применение перечисленных высокоэффективных процессов может значительно уменьшить потребность в реагентах, улучшить массогабаритные показатели, энергопотребление судовых станций приготовления питьевой воды. Предложено применение агрегата комплексного обеззараживания озонированием и УФ-излучением, совмещающего функции озонатора и устройства УФ-обеззараживания. Использование данного устройства сможет повысить надежность, ремонтпригодность, снизит массу, габариты, потребление электроэнергии станцией приготовления питьевой воды в целом. Обозначены достоинства и недостатки указанных способов обеззараживания питьевой воды. Обоснована функциональная схема станций приготовления питьевой воды с использованием синергетического эффекта активированных окислительных технологий.

Ключевые слова: обеззараживание питьевой воды, кавитация, УФ-излучение, озонирование, водоснабжение судов, активированные окислительные технологии, станция приготовления питьевой воды, технология приготовления питьевой воды.

Для цитирования: Мизгирев Д.С., Гурьянов Н.М. Совершенствование судовых станций приготовления питьевой воды с использованием синергетического эффекта активированных окислительных технологий. 2022. № 4 часть 1, С. 40—45.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.020>

Improvement of ship stations for the preparation of drinking water using the synergistic effect of activated oxidation technologies

Dmitry S. Mizgirev¹ mizgirevds@yandex.ru, Nikolai M. Gurianov¹ gurianov.nm@vsuwt.ru

¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation, Nizhniy Novgorod

Abstract. The article discusses the features of the use of activated oxidation technologies in ship stations for the preparation of drinking water. The processes of disinfection of drinking water using cavitation, UV-radiation, ozonation are considered. It is shown that the use of the listed highly efficient processes can significantly reduce the need for reagents, improve the weight and size indicators, and the energy consumption of ship drinking water preparation stations. The use of a unit for complex disinfection by ozonation and UV-radiation, which combines the functions of an ozonator and a UV-disinfection device, is proposed. The use of this device can increase reliability, maintainability, reduce weight, dimensions, and electricity consumption by the drinking water preparation station as a whole. The advantages and disadvantages of these methods of disinfection of drinking water are indicated. A functional diagram of drinking water preparation stations using the synergistic effect of activated oxidation technologies is substantiated.

Keywords: drinking water disinfection, cavitation, UV-radiation, ozonation, ship water supply, activated oxidation technologies, drinking water preparation station, drinking water preparation technology.

For citation: Dmitry S. Mizgirev, Nikolai M. Gurianov, Improvement of ship stations for the preparation of drinking water using the synergistic effect of activated oxidation technologies. 2022. № 4 part 1, P. 40—45.

Введение

Целью исследования является создание методики совершенствования судовых станций приготовления питьевой воды (далее СППВ) за счет использования синергетического эффекта активированных окислительных технологий (далее АОТ's). Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: на основе анализа современных средств и технологий приготовления питьевой воды (далее ПВ) на судах предложены способы совершенствования СППВ, произведены

исследования по определению мощности ультрафиолетового излучения (УФ-излучения) коронного разряда в озонирующем элементе, разработана новая принципиальная схема судовой СППВ с использованием синергетического эффекта АОТ's. Анализ различных отечественных и зарубежных источников свидетельствует о том, что разработки и исследования, проводимые по данной теме, сосредоточены на конкретных проблемах, а не на решении общих проблем проектирования СППВ. В работах отсутствует общая стратегия поиска, а полученные результаты не обобщены. Исследования

характеризовались отсутствием универсальности и могли быть полезны лишь при рассмотрении отдельных вопросов технологии приготовления ПВ.

Эффективное приготовление ПВ возможно лишь при комплексном подходе при проектировании судовых СППВ. Это позволяет использовать типовые узлы и оборудование с возможностью их укрупнения и агрегатирования, что приведет к снижению массы, габаритов, энергопотребления, росту санитарной надежности судового оборудования и повышению автономности плавания судна в целом. Аналогичный подход был использован авторами целого ряда различных работ, касающихся улучшения условий обитаемости судов/ Поэтому при комплексном решении проблемы современными универсальными методами и приемами можно достичь максимального эффекта как с точки зрения эпидемической безопасности, так и в экономическом аспекте.

Кавитация как способ обеззараживания питьевой воды

Кавитация – это явление разрыва капельной жидкости под действием растягивающих напряжений, вызванное изменением свойств полей скорости и давления, возникающих при разрежении в рассматриваемой точке жидкости. При разрыве капли образуется полость, заполненную паром, газом или их смесью. В результате ударных воздействий, температура во многих точках объема обрабатываемой среды резко повышается, физические процессы и химические реакции протекают более интенсивно, а органические и неорганические соединения, коллоиды и микроорганизмы уничтожаются. Поэтому кавитационную обработку можно использовать на всех этапах очистки и обеззараживания ПВ [2].

Для судовых СППВ рационально применение гидродинамических аппаратов для создания кавитации. В этих устройствах протекают два типа процессов.

1. Профильная кавитация:

- встречается на местных гидравлических сопротивлениях с хорошо обтекаемой поверхностью;
- зародыши каверн образуются на твердых стенках конструкций;
- каверны развиваются на поверхности обтекаемой детали и схлопываются на ней или в потоке сразу после ее прохождения.

Основным недостатком данной разновидности процесса является эрозионный износ ограничивающих поток стенок гидродинамических конструкций.

2. Срывная кавитация:

- происходит в вихрях за плохо обтекаемыми гидродинамическими элементами;
- каверны развиваются из зародышей, находящихся как на твердой стенке, так и в потоке.

Достоинством такого процесса является равномерное распределение каверн в потоке, что особенно важно для обеззараживания жидкости. В идеале, для повышения эффективности кавитационной обработки в кавитаторе должны

одновременно протекать процессы обоих типов. Экспериментами и опытной эксплуатацией доказано, что данные аппараты обеспечивают эффективное и стабильное обеззараживание, требуют сравнительно малого давления рабочей жидкости на входе, работоспособны при значительных давлениях сжатия, обеспечивают стабильную эжекцию во всем диапазоне рабочих характеристик, компактны, просты по конструкции и ремонтпригодны. Замена кавитаторами эжекторов в существующих СППВ – эффективный шаг к повышению санитарной надежности СПВ и судна в целом [1].

Ультрафиолетовое излучение при приготовлении питьевой воды

УФ-излучение – электромагнитное излучение, занимающее диапазон между рентгеновским и видимым излучением (диапазон длин волн 100...400 нм). Международным стандартом ISO 21348 и нормативными документами РФ определены участки спектра УФ-излучения (рис. 1), оказывающие различное биологическое воздействие.

Бактерицидным действием обладает УФ-излучение с диапазоном длин волн $\lambda = (205...315)$ нм, которое проявляется в деструктивно-модифицирующих фотохимических повреждениях ДНК клеточного ядра микроорганизма, что приводит к гибели микробной клетки в первом или последующем поколениях.

Во всем диапазоне УФ-излучения наибольшей обеззараживающей эффективностью по отношению к устойчивым к хлорированию бактериям, вирусам и цистам простейших обладает участок УФ-С.

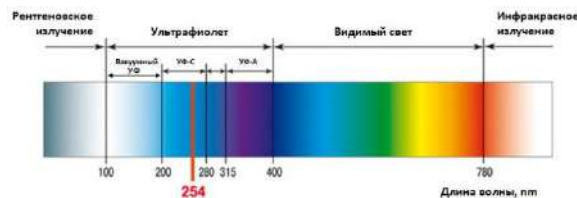


Рис. 1 – Ультрафиолет в спектре электромагнитного излучения

Достоинством метода обработки является и то, что УФ-излучение не оказывает влияния на физико-химические и органолептические свойства воды, не образует побочных продуктов, нет опасности передозировки.

Для генерации бактерицидного УФ-излучения в настоящее время в основном используются искусственные источники света. Объясняется это тем, что основная обеззараживающая часть спектра (УФ-С) естественного солнечного излучения задерживается озоновым слоем Земли, что является необходимым условием для жизни на планете.

Классификация наиболее распространенных источников УФ-излучения – газоразрядных ламп представлена на рис. 2. Рабочим телом в них являются пары металлов (ртуть), инертные газы (аргон, гелий), а также их смеси.



Рис.2 – Классификация ламп УФ-излучения

Несмотря на перечисленные достоинства технологии обработки воды, использование ламп УФ-излучения на судах ограничивают:

- восприимчивость к вибрации и ударам, резко снижающие ресурс излучателей;
 - хрупкость, вызванная особенностью конструкции излучателя (основу лампы составляет тонкостенная стеклянная трубка);
 - высокая чувствительность к качеству электропитания, сложность пускорегулирующей аппаратуры, невозможность регулировки мощности излучения;
 - влияние температуры рабочей жидкости и окружающей среды на скорость выхода лампы на рабочий режим;
 - потенциальная химическая опасность (наличие токсичных компонентов) требует соблюдения особых условий к хранению и сдаче на утилизацию;
 - сравнительно высокая стоимость оборудования.
- Однако, мирясь с указанными недостатками, газоразрядные лампы УФ-излучения нашли широкое применение на судах. Передовой в мире по данному направлению является фирма Philips, nfr;t разработками занимаются и российские компании НПО «ЭНТ», НПО «ЛИТ».

Очистка питьевой воды озонированием

Озон является уникальным окислителем большинства вредных и токсичных веществ, устойчивых к химическому и биохимическому разложению.

Озонированием при приготовлении ПВ можно обезвреживать не только живые организмы, но и целый ряд сложных загрязнителей: фенолы, цианиды, ядохимикаты, углеводороды.

При обработке ПВ механизм прямого окисления озоном в молекулярной форме является основным. Основными шагами последовательности реакций являются:

$O_3 + HO^{\cdot} \rightarrow HO_2^{\cdot} + O_2$ (образование пероксида водорода H_2O_2);

$O_3 + HO_2^{\cdot} \rightarrow HO_2^{\cdot} + O_3^{\cdot}$ (формирование озонидного радикала);

$O_3^{\cdot} + H^+ \rightarrow HO_3^{\cdot}$ (протонирование радикала в $^{\cdot}OH$);

$HO_3^{\cdot} \rightarrow ^{\cdot}OH + O_2$ (синтез кислорода).

Известно несколько путей образования озона: термический, химический, электрохимический (электролитический), фотохимический,

электросинтез в плазме газового разряда. Из них в технике используют только последние три способа.

Наиболее распространен электросинтез в плазме газового разряда. В общем случае конструкция озонатора содержит один или несколько озонирующих элементов (ОЭ), электрический блок питания (трансформатор высоковольтный, преобразователь частоты электрического тока (при необходимости)), аппаратуру автоматики (рис. 3).

Известны конструкции барьерных (используют коронный разряд) и безбарьерных (реализуют импульсный коронный или искровой разряд) ОЭ, экспериментируют с ОЭ с подвижным или жидким барьером.

Наиболее распространен первый тип ОЭ со стеклянным или стеклоэмалевым плоским или трубчатым диэлектрическим барьером. Типовые решения ОЭ представлены на рис. 4.

Следует отметить, что трубчатые ОЭ вертикального или горизонтального расположения, применяемые в судовых условиях, имеют наибольшую эффективность (площадь поверхности разряда) при минимальных массе и габаритах.

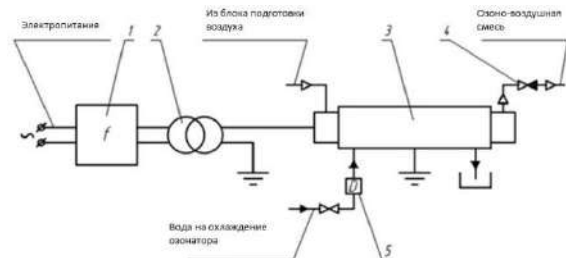


Рис. 3 – Озонаторный агрегат с электропитанием повышенной частоты:

- 1 – преобразователь частоты электротока; 2 – трансформатор высоковольтный; 3 – блок ОЭ; 4 – клапан невозвратный; 5 – реле протока

На эффективность озонаторных агрегатов влияет ряд факторов. Для обеспечения максимальной производительности по озону целесообразно:

- увеличение вложенной мощности, приведенной энергии и плотности энергии, что достигается увеличением напряжения и частоты электропитания;
- минимизировать разрядный промежуток и обеспечить постоянное охлаждение, что повысит эффективность образования озона;
- использовать коррозионностойкий материал электродов, стойкие к выщелачиванию диэлектрики, конструкции электродов с регулярным профилем и микрорельефом, что гарантирует высокую концентрацию озона в смеси;
- применять осушение и обогащение кислородом поступающего на обработку воздуха, а также рациональное давление и скорость потока газа в конкретной конструкции ОЭ, что увеличивает производительность процесса.

Из анализа конструкций ОЭ (рис. 4) следует, что возможность использования бактерицидного УФ-излучения коронного разряда для обработки ПВ обеспечивает только вариант г). Во всех остальных случаях УФ-лучам препятствует непрозрачный низкпотенциальный электрод.

С другой стороны, для обеспечения максимальной производительности по озону

требуется минимальный разрядный промежуток, размер которого значительно ограничивается точностью изготовления стеклянного диэлектрика.

Для решения поставленных задач, конструкция высокопотенциального электрода должна по возможности повторять форму диэлектрика, и, подобно ему, являться прозрачной для УФ-излучения. Решение проблемы светопропускания диэлектрика, как отмечено выше, обеспечивается применением кварцевого стекла (поставляется в виде точно изготовленных труб или колб и обладает лучшими прочностными свойствами по сравнению с минеральным стеклом). Необходимость использования повышенного напряжения питания (от 8000 В) технически решаема. Минимизация разрядного промежутка при обеспечении прозрачности реализуется сетчатыми электродами. (использование просечных, просечно-вытяжных листов, плетеной или спирально навитой проволоочных сеток).

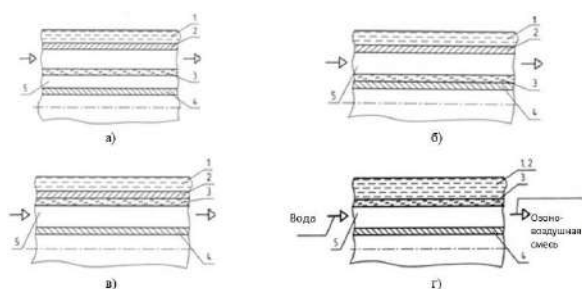


Рис. 4 – Типовые конструктивные решения ОЭ

а) два разрядных промежутка; б) диэлектрический барьер размещен на высокопотенциальном электроде; в) диэлектрический барьер размещен на низкопотенциальном электроде; г) охлаждающая жидкость выполняет роль низкопотенциального электрода.

1 – охлаждающая жидкость; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – диэлектрический барьер; 4 – высокопотенциальный электрод; 5 – разрядная зона.

Разработка функциональной схемы СППВ с использованием синергетического эффекта АОТ's

На основании вышеприведенного анализа существующих технологических и конструктивных решений, при водоподготовке в СППВ предлагается к применению следующая последовательность активных воздействий (рис. 5).



Рис. 5 – Функциональная схема СППВ с использованием синергетического эффекта АОТ's

Данная технология на судах внутреннего и смешанного (река-море) плавания может быть реализована следующим образом.

Вода из пресноводного водоема принимается судном с помощью насоса, подвергается грубой фильтрации и последующему отстаиванию в танках запаса заборной воды. На данном этапе отделяются крупные механические и биологические примеси,

оседают механические взвеси, всплывают легкие загрязнители.

Далее вода забирается насосом СППВ и подается через гидродинамический кавитатор, где смешивается с озоновоздушной смесью, генерируемой в ОЭ. На данном этапе происходит первичное обеззараживание за счет одновременной высокоактивной обработки потока гидродинамической кавитацией и озоном.

На следующем этапе в контактной колонне обеспечивается необходимое для окисления примесей время контакта активного окислителя с обрабатываемой водой. Отделяющийся при этом воздух и остатки не прореагировавшей озоновоздушной смеси отводятся в атмосферу.

После этого вода подается на гранулированную загрузку фильтра, где происходит отделение взвешенных частиц и механических загрязнителей.

Далее поток поступает в зону обработки УФ-излучением, где осуществляется вторичное обеззараживание УФ-лучами. Одновременно с этим происходит разложение остаточного озона в воде.

Далее очищенная ПВ поступает в накопительный танк, где усредняется с уже имеющейся в нем водой и кондиционирует последнюю, после чего насосом и гидрофором судовой системы ПВ раздается потребителям.

В результате описанного принципа работы СППВ будет обеспечиваться высокое качество ПВ при недопущении превышения дозы окислителя.

Число, назначение и работа функциональных единиц СППВ обеспечат полное и комплексное решение поставленной задачи.

Предлагаемая технология будет иметь следующие основные преимущества:

- гидродинамический кавитатор при обработке ПВ позволит получить дополнительный эффект обеззараживания воды кавитацией при высокоэффективном смешении сред и гарантированной эжекции газообразного потока озона-воздушной смеси, что повысит качество ПВ;
- использование совместной обработки гидродинамической кавитацией и озонированием позволит достигнуть синергетического эффекта высокой степени обеззараживания при значительном снижении дозировки необходимых реагентов, повышая санитарную надежность СППВ;
- применение агрегата комплексного обеззараживания вместо отдельных озонатора и установки УФ-излучения значительно уменьшит массогабаритные показатели и энергопотребление системы;
- нововведения позволят повысить надежность, ремонтпригодность, снизить длительность и трудоемкость обслуживания СППВ, уменьшат номенклатуру сменно-запасных частей, что особенно актуально в настоящее время в судовых условиях [3].

Заключение

На основании проведенных исследований была предложена функциональная схема СППВ с использованием синергетического эффекта АОТ's, обеспечивающая повышение эффективности обработки воды за счет рациональной организации двухступенчатого обеззараживания и фильтрации, а также синергетического эффекта при взаимодействии активных воздействий.

Для дальнейших работ по разработке методики проектирования предлагаемых СППВ необходимо проведение экспериментальных исследований с целью оценки работоспособности и эффективности данной технологии и доказательства

предполагаемого синергетического эффекта при одновременном применении кавитации, озонирования и УФ-излучения при приготовлении ПВ.

Литература

1. Мизгирев Д.С., Черепкова Е.А., Слюсарев А.С., Отделкин Н.С. Объединенная судовая система приготовления и кондиционирования питьевой воды // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 3. С. 173-183.
2. Мизгирев Д.С. Направления совершенствования судовых станций приготовления питьевой воды в условиях переменного состава исходной воды // Великие реки - 2020. Труды 22-го международного научно-промышленного форума. 2020. С. 45.
3. Патент № 2705355 Российская Федерация, МПК C02F 9/06(2006.01), C02F 1/78(2006.01), C02F 1/46(2006.01), C02F 1/32(2006.01), B01D 36/00(2006.01). Устройство очистки и приготовления питьевой воды: № 2705355: заявл. 23.04.2019; опубл. 06.11.2019/ Мизгирев Д.С., Гурьянов Н.М.; заявитель Гурьянов Николай Михайлович. – 10 с.: ил. – Текст: непосредственный.
4. Волков С.В. Опыт и перспективы применения УФ обеззараживания. Часть I / С.В. Волков, С.В. Костюченко и др. // Экология и промышленность России. – 2000. – Сентябрь. – С. 30-34.
5. Барац В.А., Николаев М.В., Эльпинер Л.И. Водоснабжение судов речного флота. – М.: Транспорт, 1974. – 144 с.
6. Курников А.С. Исследование и разработка методики проектирования судовых систем приготовления озона: автореф. дис... канд. техн. наук. / А.С. Курников – Л., 1985. – 22 с.
7. Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях: Руководство Р 3.5.1904-04. М: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2005. 46 с.
8. Пичугин Ю.П., Филиппов В.Г., Перунов А.А., Зеленов В.Е., Андреев В.В., Ильин В.В., Назаров Ю.А. Устройство и работа высокоресурсных генераторов озона / Ю.П. Пичугин, В.Г. Филиппов, А.А.Перунов, В.Е. Зеленов, В.В. Андреев, В.В. Ильин, Ю.А. Назаров // Всероссийская конференция по озону. Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии. – Москва, МГУ 2019 г. – С. 1-23.
9. Mizgirev D.S., Vlasov D.V., Vlasov V.N. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding" 2021. С. 54.
10. Rami Pedahzur, Ovadia Lev, Badri Fattal and Hillel I. Shuval The interaction of silver ions and hydrogen peroxide in the inactivation of E. coli: a preliminary evaluation of a new long acting residual drinking water disinfectant // Water Science and Technology. – Vol. 31. – № 5–6, 1995.
11. Singel P.C. Assessing ozonation research needs in water treatment. American Water Works Association Journal, 1990. Vol.82. N10. pp. 78 - 88. doi:10.1002/j.1551-8833.1990.tb07040.x

References

1. Mizgirev D.S., Cherepkova E.A., Slyusarev A.S., Otdelkin N.S. Obedinennaya sudovaya sistema prigotovleniya i kondicionirovaniya pitevoj vody [Integrated marine system for the preparation and conditioning of drinking water]. Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyate'nosti. 2019. T. 27. № 3. S. 173-183.
2. Mizgirev D.S. Napravleniya sovershenstvovaniya sudovyh stancij prigotovleniya pit'evoj vody v usloviyah peremennogo sostava iskhodnoj vody [Directions of improvement of ship stations of preparation of drinking water in conditions of variable composition of source water]. Velikie reki 2020. Trudy 22-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. 2020. S. 45.
3. Patent № 2705355 Rossijskaya Federaciya [Russian Federation], MPK C02F 9/06(2006.01), C02F 1/78(2006.01), C02F 1/46(2006.01), C02F 1/32(2006.01), B01D 36/00(2006.01). Ustrojstvo ochistki i prigotovleniya pitevoj vody [Device for treatment and preparing drinking water]: № 2705355 decl. 23.04.2019 : publ. 06.11.2019/ Mizgirev D.S., Gurianov N.M.; declarant Gurianov Nikolay Mihaylovich. 10 s.: il.
4. Volkov S.V. Opyt i perspektivy primeneniya UF obezzarazhivaniya. Chast I [Experience and prospects of using UV disinfection. Part I] / S.V. Volkov, S.V. Kostyuchenko i dr. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]. 2000. September. S. 30-34.
5. Barac V.A., Nikolaev M.V., El'piner L.I. Vodosnabzhenie sudov rechnogo flota [Water supply of river fleet vessels]. M.: Transport, 1974. 144 s.
6. Kurnikov A.S. Issledovanie i razrabotka metodiki proektirovaniya sudovyh sistem prigotovleniya ozona [Research and development of methods for designing shipboard ozone preparation systems]: avtoref.dis... kand. tekhn. nauk. A.S. Kurnikov L., 1985. 22 s.
7. Ispol'zovanie ul'trafioljetovogo baktericidnogo izlucheniya dlya obezzarazhivaniya vozduha v pomeshcheniyah: Rukovodstvo [The use of ultraviolet bactericidal radiation for indoor air disinfection: Manual] R 3.5.1904-04. M: Federal'nyj centr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2005. 46 s.
8. Pichugin YU.P., Filippov V.G., Perunov A.A., Zelenov V.E., Andreev V.V., Il'in V.V., Nazarov YU.A. Ustrojstvo i rabota vysokoresursnyh generatorov ozona [Design and operation of high-resource ozone generators]. YU.P.

- Pichugin, V.G. Filippov, A.A. Perunov, V.E. Zelenov, V.V. Andreev, V.V. Il'in, YU.A. Nazarov. Vserossiyskaya konferenciya po ozonu. Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii [Russian Conference on Ozone. Ozone and other environmentally friendly oxidizing agents. Science and technology.]. Moskva, MGU 2019 g. S. 1-23.
9. Mizgirev D.S., Vlasov D.V., Vlasov V.N. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus. Journal of Physics: Conference Series. Сер. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021, Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding" 2021. P. 54.
10. Rami Pedahzur, Ovadia Lev, Badri Fattal and Hillel I. Shuval The interaction of silver ions and hydrogen peroxide in the inactivation of E. coli: a preliminary evaluation of a new long acting residual drinking water disinfectant. Water Science and Technology. Vol. 31. № 5–6, 1995.
11. Singel P.C. Assessing ozonation research needs in water treatment. American Water Works Association Journal, 1990. Vol.82. N10. pp. 78 - 88. doi:10.1002/j.1551-8833.1990.tb07040.x

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Николай Михайлович Гурьянов, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gurnikol@yandex.ru

Dmitriy S. Mizgirev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Nikolay M. Guryanov, graduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: gurnikol@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2022.

Научная статья

УДК 629.124.9.039.001.63

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.021>

Облик мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах ограниченной грузоподъемности для арктического побережья

А.И. Азовцев¹ azovtsev@msun.ru, С.А. Огай¹ ogay@msun.ru, И.С. Карпушин² karpushin5@mail.ru

¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, ²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Данная статья продолжает серию публикаций, посвященных обоснованию необходимости исследований, разработки и производства арктических плавающих вездеходов на новом принципе движения – на воздухоопорных гусеницах (ВГ). Крупномасштабные модельные испытания подтвердили уникальную универсальность мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах, сочетающих мореходность, в том числе и в прибойной полосе, вездеходность на пересеченной местности, по снегам и болотам любой категории, по мелким торосам и пням лесосеки как смену условий по входу в воду и выходу из воды на лёд, при ходе одной гусеницей по льду, другой по воде. Систематические затруднения по созданию экспериментального образца вынуждают надеяться на успех при малых размерах вездехода. Облик мореходного вездехода грузоподъемностью 10 тонн удачно сочетает широкие провозные способности при умеренных его размерах и энерговооруженности.

Ключевые слова: проектирование, транспортная доступность, перевозка длинномеров, мореходные вездеходы, воздухоопорные гусеницы, малая грузоподъемность, малый расход топлива, универсальность.

Благодарности: авторы выражают благодарность Ивану Владимировичу Андрианову, генеральному директору ООО «Чукотминерал», за предоставленную информацию о потребности амфибийного транспорта.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках служебного задания Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского.

Для цитирования: Азовцев А.И., Огай С.А., Карпушин И.С. Облик мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах ограниченной грузоподъемности для арктического побережья, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 46—51.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.021>

The layout seagoing all-terrain vehicle on air-cushion caterpillars a smaller cargo carrying capacity for arctic shore

Anatoli I. Azovtsev¹ azovtsev@msun.ru, Sergey A. Ogay¹ ogay@msun.ru, Ivan S. Karpushin² karpushin5@mail.ru

¹ Maritime State University named admiral G.I. Nevelskoi. Russian Federation, ² Far Eastern State Technical Fisheries University. Vladivostok, Russian Federation.

Abstract. This paper continues the series of publications on the substantiation of the need for the research into, development of and manufacturing arctic amphibian all-terrain vehicles basing on a new propulsion principle, ie on air-cushion caterpillars (ACC). Large scale model trials have proved the unique versatility of seagoing all-terrain vehicles on air-cushion caterpillars, combining seaworthiness, including surfing capabilities, cross-country travelling ability over rough terrain, snow deposits and marshes of any category, over smaller ice blocks and tree stubs at the logging site where there are alterations in conditions of entering the water and going up to the ice surface, as well as when travelling one caterpillar over ice, and the other over water. Persistent handicaps in creating an experimental model make us lay our hopes on the success of a smaller sized all-terrain vehicle. The layout of a 10t cargo carrying capacity seagoing all-terrain vehicle encompasses its considerable carrying capacity and moderate size and specific power.

Key words: designing, transportation accessibility, the oversized transportation, all-terrain vehicles, air-cushion caterpillars, limited cargo carrying capacity, efficient fuel consumption, versatility.

Acknowledgments: the authors are grateful to Ivan V. Andrianov, Director General of the Chukotmineral LTD for providing information on the amphibious transportation demand

Financial Support: the research was carried out within the assignment of the Maritime State University named admiral G.I. Nevelskoi.

Для цитирования: Anatoli I. Azovtsev, Sergey A. Ogay, Ivan S. Karpushin, The layout seagoing all-terrain vehicle on air-cushion caterpillars a smaller cargo carrying capacity for arctic shore, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 46—51.

Введение

Апробация обоснований преимуществ предлагаемых к внедрению мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах прошла на

Государственных конкурсах и на международном уровне.

Концептуальные положения создания универсальных мореходных вездеходов при высокой плавучести их воздухоопорных гусениц были одобрены ГКНТ СССР. Постановлением № 850 от 18

сентября 1990 года для проведения научно-исследовательских работ по технической проработке универсального экологичного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах из средств государственного бюджета 60 тыс. рублей было выделено ЦКБ по СПК на 1990 год. Заявленная научно-техническая проработка выполнялась на основе задела, выполненного ДВВИМУ им. адм. Г.И. Невельского (ныне МГУ им. адм. Г.И. Невельского) и была отмечена дипломом первой степени и золотой медалью.

Успешные крупномасштабные модельные испытания стали основой привлечения внимания к вездеходу Мингео СССР, Миннефтегазстрой СССР, Минтранса России. Министерство регионального развития Российской Федерации на основе острой конкурентной борьбы в рабочей группе по Арктике и Северу Российско-Канадской межправительственной экономической комиссии включило в план деятельности комиссии создание совместного (Россия-Канада) предприятия по разработке и производству арктических плавающих вездеходов на воздухоопорных гусеницах (п. 8, 31.01.2014, Канада).

В связи с санкциями Канада вышла из сотрудничества. Организатор сотрудничества Министерство регионального развития Российской Федерации ликвидировано. Российский задел по разработке мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах выполненный по ФЦП «Развитие гражданской морской техники» используется для инициативных разработок вездеходов различного назначения. Этапность создания таких вездеходов предусматривается испытание экспериментального образца. Многочисленные договоренности по разработке и испытаниям экспериментальных образцов в условиях перестроечных кризисов прекратились при потере дееспособности заказчика.

Пощряя проработки транспорта на воздухоопорных гусеницах, ГКТН СССР рекомендовал начать с малых грузоподъемностей практическое освоение транспортных средств на воздухоопорных гусеницах (ТСВГ) [1].

Обеспечение транспортных и транспортно-технологических операций при деятельности баз различного назначения на арктическом побережье [1,2,3,4,5,6,7,8] может быть достигнуто при грузоподъемности 10 тонн. Настоящая разработка облика подтвердила рациональность создания мореходных вездеходов такой грузоподъемности.

Преимущества их оцениваются как уникальная универсальность в сочетании вездеходности, амфибийности и мореходности. По сравнению с амфибийными судами на воздушной подушке предлагаемые мореходные вездеходы без дополнительных движителей способны работать на пересеченной местности, преодолевая крутые подъемы, и имея хорошую управляемость на боковом уклоне; без потери опорной реакции проходят над траншеями и трещинами во льду; не застревают в нагромождениях мелких торосов и проходят по пятам лесосеки; имеют коэффициент полезного действия гусеницы в полтора – два раза выше чем у воздушного винта СВП, что оценивается как такого же уровня снижение потребной энерговооруженности и расхода топлива [1].

Последнее стало причиной изысканий в США замены СВП на гусеничные с большой плавучестью гусениц.

69 тысяч мелких населенных пунктов Севера и Дальнего Востока не имеют современной круглогодичной транспортной доступности. Затруднено своевременное оказание медицинской помощи, с большими задержками поступают лекарства и почтовые отправления авиапочтой. Сверхпогодозависимость авиации в арктических регионах оценивается как 150 нелётных дней в году. Предлагаемые ТСВГ не имеют ограничений по скорости ветра, по осадкам, температуре воздуха, что делает ТСВГ перспективными для выполнения спасательных операций.

Транспортная доступность оленеводческих кочевий традиционно низкая. Повысить частоту посещения кочевий с завозом объектов потребления предлагается расширением использования продукции оленеводства и рыбного промысла базами, пока что, точечного освоения региона. Безопасно и эффективно по расписанию или по вызову по современной связи это можно реализовать на универсальном всепогодном вездеходе на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 10 тонн.

При крайне низком давлении на грунт [9, 2] ТСВГ-10 способны перевозить грузы и пассажиров по заболоченной и заснеженной тундре и лесотундре, двигаясь по кратчайшим трассам, без затрат на обустройство трасс. Важность этих преимуществ возрастает в условиях пионерного и быстрого освоения новых районов бездорожья, особенно при небольших и временных грузопотоках.

Использование мореходных вездеходов обеспечивает многократное расширение прибрежного промысла рыбы, морепродуктов, сбор штормовых выбросов. Многочисленные базы не нуждаются в причальных сооружениях. Без перевалки объекты промысла доставляются в цеха обработки. Разработаны средства механизации прибрежного промысла и сбора штормовых выбросов [10].

Концепция облика ТСВГ-10

Обобщая опыт разработки проектов и самоходных макетов, широко опубликованный, в том числе и в упомянутых источниках в настоящей статье, основные концептуальные положения облика ТСВГ-10 определены в следующих предложениях:

- объем погруженной в воду части гусениц обеспечивает подъем жестких конструкций корпуса над водой или допускает весьма малое их погружение;
- ТСВГ-10 имеет две воздухоопорные гусеницы, расположенные параллельно, соединенные грузовой платформой;
- каждая из воздухоопорных гусениц имеет внутренний понтон для размещения механизмов привода и воздухоподдержания;
- ходовая рубка вмещает 2 человека экипажа и устанавливается в носовой части левой гусеницы;
- привод гусениц осуществляется вращением кормовых барабанов, гладкие барабаны перетягивают гладкую гусеницу;
- размеры и частота установки пневмоплиц на внешней поверхности гусеницы на воде обеспечивают достаточную плавучесть в

соответствии с настоящей концепцией, на грунте – обеспечивают высокую площадь опирания при малом давлении на грунт;

- в носовой части грузовой платформы устанавливается аппарат для въезда самоходной техники, стаскивания волокуш;

- верхняя часть воздухоопорной гусеницы защищена капотом, допускающим хождение по нему члена экипажа;

- аппарат устанавливается горизонтально на уровне грузовой платформы при перевозке длинномеров, носовая оконечность аппарата поднимается выше грузовой платформы при перевозке малогабаритных грузов на воде и защищает груз от забрызгивания;

- управление ТСВГ-10 осуществляется разностью скоростей движения гусениц;

- верхняя ветвь гусеничной ленты расположена выше внутригусеничного понтона, который имеет антифрикционное и антиобледенительное покрытие;

- высота внутригусеничного понтона не менее высоты салона легкового автомобиля;

- диаметр приводных барабанов соизмерим с высотой внутригусеничного понтона;

- материал корпуса – алюминиевые сплавы;

- материал гусеницы – тонкая резинокросовая транспортёрная лента.

Расчет тактико-технических данных облика ТСВГ-10

При расчете тактико-технических данных при разработке типоразмерного ряда ТСВГ [1] широко применялся масштабный пересчет линейных, плоскостных и объемных параметров.

Базовым параметром каждого образца типоразмерного ряда был принят дедвейт. В настоящем проекте в качестве прототипа принят ТСВГ-20, дедвейтом 20 тонн. Параметры, полученные масштабным пересчетом с прототипа, корректируются в соответствии с массивом концептуальных положений ТСВГ-10.

Дедвейт как массовый параметр пересчитывается по кубу масштаба.

$$m^3 = \frac{DW_{20}}{DW_{10}} = \frac{20,0}{10,0} = 2.$$

Здесь:

$DW_{20} = 20$ т – дедвейт прототипа;

$DW_{10} = 10$ т – дедвейт разрабатываемого образца.

Масштаб определен как:

$$m = \sqrt[3]{m^3} = \sqrt[3]{2} = 1,26.$$

Сходственные линейные размеры вездехода ТСВГ-10 получаем делением размеров ТСВГ-20 на $m=1,26$.

Ключевой параметр проекта – водоизмещение Δ на основе анализа нескольких прототипов предлагается определить по зависимости:

$$\Delta = \alpha_{\Delta} \cdot DW,$$

где коэффициент $\alpha_{\Delta} = 1,8 \div 2,0$.

Придерживаясь направленности настоящего проекта на снижение его весогабаритных параметров, приняли меньшее значение $\alpha_{\Delta} = 1,8$:

$$\Delta = 1,8 \times 10,0 = 18,0 \text{ т.}$$

Площадь опирания воздухоопорной гусеницы (ВГ) на грунт у прототипа соответствовала допустимому давлению на грунт $[P_{гр}]_{20}=15,0$ кПа при дедвейте 20,0 т.

Давление на грунт определено масштабным пересчетом:

$$P_{гр} = \frac{[P_{гр}]_{20}}{m} = \frac{15,0}{1,26} = 11,905 \text{ кПа.}$$

В расчетах принято округление

$$P_{гр\ 10} = P_{гр} = 12,0 \text{ кПа.}$$

Площадь опирания ВГ S_p определена делением веса ТСВГ-10 на давление:

$$S_p = \frac{g \cdot \Delta}{P_{гр}} = \frac{9,81 \cdot 18,0}{12,0} = 14,715 \text{ м}^2.$$

Округлено в дальнейших расчетах:

$$S_p = 15,0 \text{ м}^2.$$

Множество линейных размеров, определяющих облик ТСВГ, рационально представлено на схемах сечений ВГ и скегов [1].

Линейный размер ширины гусеницы $V_{л}$ при ее ширине на прототипе $V_{л20}=1,8$ м получен пересчетом $V_{л}=1,43$ м.

В соответствии с концепцией лента ВГ изготавливается из тонкой резинокросовой транспортёрной ленты. Один из ее стандартов имеет ширину 1,0 м. Это позволяет рационально расходовать ленту при ширине $V_{л} = 1,5$ м. С учетом надбавок на зазоры 0,02 м между скегом и бортовой кромкой ленты в проекте принято:

$$V_{л10} = V_{л} + 2 \cdot 0,02 = 1,5 + 2 \cdot 0,02 = 1,54 \text{ м.}$$

Построение геометрии поперечного сечения основано на длине контактного пятна L_p ВГ, которая у прототипа составляет 6,6 м.

$$L_{p10} = \frac{L_{p20}}{m} = \frac{6,6}{1,26} = 5,24 \text{ м.}$$

Под действием постоянного избыточного давления $P_{и}$ бесконтактные участки ВГ в носовой и кормовой оконечностях имеют круговую форму. Радиус $R_{но} = R_{ко}$ этих окружностей получен пересчетом при его величине на прототипе 3,653 м:

$$R_{но} = R_{ко} = \frac{R_{но20}}{m} = \frac{3,635}{1,26} = 2,90 \text{ м.}$$

Базовый линейный размер – расстояния между осями барабанов:

$$L = \frac{L_{20}}{m} = \frac{10,0}{1,26} = 8,0 \text{ м.}$$

Основные элементы облика ТСВГ-10 с обозначениями размеров, полученных масштабным пересчетом с прототипа с корректировкой в соответствии с концептуальными положениями, представлены на рис. 1. Указанные

размерения соответствуют их работоспособным значениям при грузоподъемности ТСВГ 10 тонн.

Представленный эскизный облик ТСВГ-10 соответствует цели проекта и его концептуальным положениям.

На рис.1(а) приведена геометрия миделя (корпус и ВГ).

На рис.1(б) показана совмещенная схема корпуса и ВГ, вид продольного разреза левой гусеницы:

габаритная длина ТСВГ-10 – 11,55 м;

габаритная ширина – 5,66 м;

габаритная высота на грунте 4,60 м при клиренсе полозьев 0,307 м.

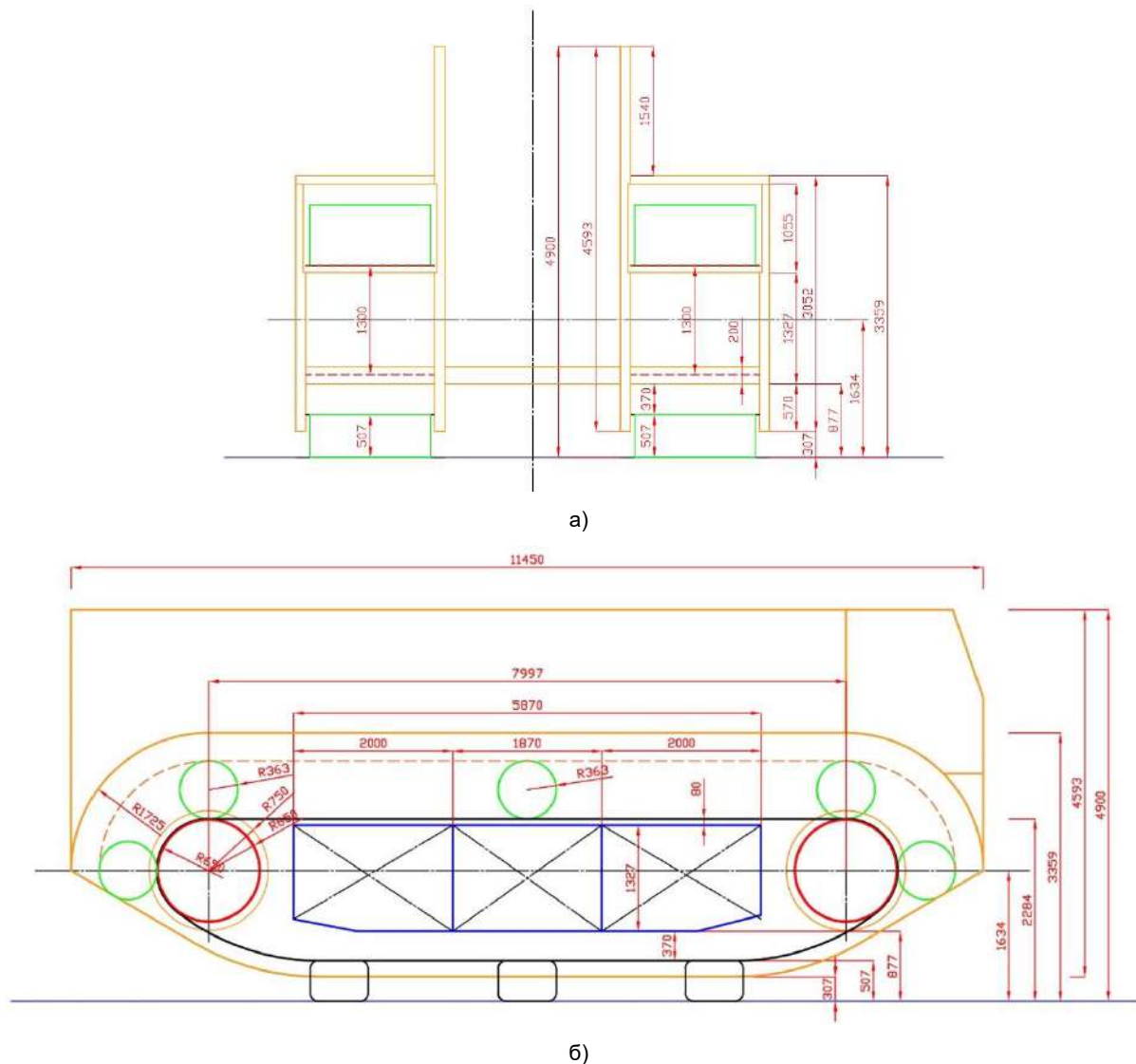


Рис.1 Основные элементы облика мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 10 тонн ТСВГ-10: а) миделевое сечение по корпусу совмещенное с сечениями по гусенице; б) совмещенные разрезы по диаметральной плоскости и по левой гусенице

Грузовая платформа шириной 2,10 м и ее бортовые ограждения высотой 3,53 м.

Тактико-технические данные на стадии разработки облика ТСВГ-10 составляют оценку тяговых способностей ВГ, мощности привода и воздухонагнетателей при обеспеченном выходе на глиссирование при полной загрузке и при подъеме на уклон.

При обеспечении давления в воздушной подушке ВГ $P_{и}=12$ кПа мощность центробежных вентиляторов с возможностью форсажа составит 90 кВт.

Тяга T_y на уклон при угле $\alpha_y = 20^\circ$:

$$T_y = g \Delta \sin \alpha_y = 9,81 \cdot 18,0 \cdot 0,342 = 60,4 \text{ кН.}$$

При заданной скорости v_y подъема на уклон 7 км/ч (1,94 м/с) потребная мощность N_y составит:

$$N_y = T_y \cdot v_y = 60,4 \cdot 1,94 = 117,4 \text{ кВт.}$$

Прямое прогнозирование мощности при движении на воде основано на исследованиях СВГ [1].

Глиссирующий режим хода может быть обеспечен при числе $Fr=1,2$. Длина ватерлинии $L_{вл} = 6,68$ м, при скорости хода 9,82 м/с:

$$v_{гл} = Fr \sqrt{gL_{гл}} = 1,2 \sqrt{9,81 \cdot 6,68} = 9,82 \text{ М/с;}$$

$$v_{гл} = 18,9 \text{ уз.}$$

В расчете мощности $N_{эл}$ скорость задана максимальная 20 уз.:

$$N_{г\text{л}} = \frac{R}{\Delta} \cdot \Delta \cdot v_{г\text{л}} = \frac{0,033 \cdot 18000 \cdot 10,28}{102 \cdot 0,5} = 120 \text{ кВт.}$$

Здесь $\frac{R}{\Delta}$ - относительное сопротивление без учета влияния гибких ограждений и корпуса [1],

Δ - водоизмещение, кг,

$\eta = 0,5$ – КПД ВГ.

Для преодоления горба волнового сопротивления при числе Фруда $Fr=0,7$ в водоизмещающем режиме при длине ватерлинии $L_{вл} = 8,0$ м необходимо обеспечить скорость:

$$v_{горб} = Fr_{горб} \sqrt{gL_{вл}} = 0,7 \sqrt{9,81 \cdot 8,0} = 6,2 \text{ м/с.}$$

Мощность потребная для преодоления горба:

$$N_{горб} = \frac{R}{\Delta} \cdot \Delta \cdot v_{горб} = \frac{0,052 \cdot 18000 \cdot 6,2}{102 \cdot 0,5} = 114 \text{ кВт.}$$

Принято, что на встречном волнении мощность $N_{встр}$ в 2 раза больше, чем на тихой воде.

$$N_{встр} = 2 \cdot N_{г\text{л}} = 2 \cdot 120 = 240 \text{ кВт.}$$

С запасом на внутренние потери предполагается установить двигатель $N_{г\text{л}}=300$ кВт, и 90 кВт на вентиляторы. На тихой воде возможно достижение скорости 40÷50 уз.

Заключение

При сходной грузоподъемности и скорости хода скеговое СВП №300 имеет мощность силовой установки в 5 раз больше. СВП «Сормович» при полезной нагрузке 9 т и скорости 50 уз. работал при мощности 1900 кВт, что превышает предполагаемую мощность ТСВГ-10 почти в 5 раз. Предполагаемое пятикратное снижение расхода топлива в сравнении с СВП представляется весомым аргументом для создания ТСВГ-10. Предлагаемый облик даёт надёжное обоснование для составления технического задания на проект.

Литература

1. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Разработка типоразмерного ряда мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения побережья и замерзающего шельфа // Морские интеллектуальные технологии. 2013. - №S1.- С.34-37.
2. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Снижение нагрузки на грунт тундры увеличением длины контакта пневмоплицы мореходного вездехода // Морские интеллектуальные технологии. 2016.–№3-1 (33).–С. 100-105.
3. Азовцев А.И. Мореходные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для повышения эффективности освоения биоресурсов с баз на открытом побережье // В сборнике: Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов мирового океана. Материалы V Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. 2018. С. 5-6.
4. Вальков В.Е. Проблемы организации снабжения порт-пунктов с необорудованным берегом //Материалы 9-ой международной научно-практической конференции: Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток.– МГУ.–2011.С. 208-2010.
5. Ганнесен В.В. Актуальность разработки и внедрения малотоннажных вездеходов на воздухоопорных гусеницах // Материалы 9-ой международной научно-практической конференции: Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток.– МГУ.– 2011. С.134-136.
6. Азовцев А.И., Карпушин И.С. Амфибийный транспорт в решении социально-экономических проблем освоения шельфа.– В сб. тезисов: Экономика освоения океана. Владивосток, 1985.– С. 67-70.
7. Максимов Е.А., Карпушин И.С. Транспортное обеспечение в развитии хозяйств марикультуры // Материалы 9-ой международной научно-практической конференции: Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток.– МГУ.–2011. С. 122-123.
8. Петрашёв С.В., Клиндух М.А. Транспортные средства обеспечения морских нефтегазовых сооружений мореходными вездеходами на воздухоопорных гусеницах // Материалы 9-ой международной научно-практической конференции: Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток.– МГУ.– 2011. С. 189-190
9. Чеботаев А.А., Мельник А.Д. Безвредные транспортные средства для Севера // Научно-технический прогресс и перспективы развития новых специализированных видов транспорта. Сб. мат-ов Всесоюзной научно-практической конференции. 23-26 октября 1990.4.2. М.– ВНИИПК техоргнефтегазостроя, 1990. С. 115-125.
10. Азовцев А.И. Транспортное обеспечение прибрежного промысла мореходными вездеходами / А.И.Азовцев, С.А. Огай // Транспортное дело России. 2015. №6. С. 182-183.

References

1. Azovcev A.I., Ogaj S.A., Moskalenko O.V. Razrabotka tiporazmernogo rjada morehodnyh vezdehodov na vozduhoopornyh gusenichah dlja kompleksnogo osvoenija poberezh'ja i zamerzajushhego shelf'a [Development of a standard-size range of seagoing all-terrain vehicles on air-cushion caterpillars for the integrated development of the coast and the freezing littoral] // Morskie intellektual'nye tehnologii. Specvypusk №1. 2013. S.34-37.
2. Azovcev A.I., Ogaj S.A., Moskalenko O.V. Snizhenie nagruzki na grunt tundry uvelicheniem dliny kontakta pnevmoplicy morehodnogo vezdehoda [Reducing the load on the tundra soil by increasing the contact length of the seagoing all-terrain vehicle pneumatic plate] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2016.–№3(33) T.1.–С. 100-105.
3. Azovcev A.I. Morehodnye vezdehody na vozduhoopornyh gusenichah dlja povyshenija jeffektivnosti osvoenija bioresursov s baz na otkrytom poberezh'e [Sea-going all-terrain vehicles on air-cushion caterpillars for increasing

- the efficiency of the development of biological resources from open coast stations] // V sbornike: Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov mirovogo okeana. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2-h chastyah. 2018. S. 5-6.
4. Val'kov V.E. Problemy organizatsii snabzheniya port-punktov s neoborudovannym beregom [Issues of organizing the supply of gearless smaller ports] // Materialy 9-oj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Vladivostok.– MGU.–2011. S. 208-210.
 5. Gannesen V.V. Aktual'nost' razrabotki i vnedrenie malotonnazhnykh vezdehodov na vozduhopornyyh gusenichah [Relevance of the development and introduction of small-capacity all-terrain vehicles on air-cushion vehicles] // Materialy 9-oj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Vladivostok.– MGU.– 2011. S.134-136.
 6. Azovcev A.I., Karpushin I.S. Amfibijnyj transport v reshenii social'no-jekonomicheskikh problem osvoeniya shelf'a [Amphibious transport in solving socio-economic problems of shelf development] //.– V sb. tezisov: Jekonomika osvoeniya okeana. Vladivostok, 1985.– S. 67-70.
 7. Maksimov E.A., Karpushin I.S. Transportnoe obespechenie v razvitii hozjajstv marikul'tury [Transport support in mariculture farm development] // Ma-terialy 9-oj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Vladivostok.– MGU.–2011. S. 122-123.
 8. Petrashjov S.V., Klinduh M.A. Transportnye sredstva obespecheniya morskikh neftegazovykh sooruzhenij morehodnymi vezdehodami na vozduhopornyyh gusenichah [Transportation engineering vehicles for providing offshore oil and gas facilities with seagoing all-terrain vehicles on air-cushion caterpillars] // Materialy 9-oj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Vladivostok.– MGU.– 2011. S. 189-190
 9. Chebotaev A.A., Mel'nik A.D. Bezzvrednye transportnye sredstva dlja Severa [Harmless vehicles for the North] // Nauchno-tehnicheskij progress i perspektivy razvitija novykh specializirovannykh vidov transporta. Sb. mat-ov Vsesojuznoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 23-26 oktjabrja 1990.4.2. M.– VNIIPK tehorgneftegazstroja, 1990. S. 115-125.
 10. Azovcev A.I. Transportnoe obespechenie pribrezhnogo promysla morehodnymi vezdehodami [Transport support of coastal fishing by seagoing all-terrain vehicles] / A.I.Azovcev, S.A. Ogaj // Transportnoe delo Rossii. 2015. №6. S. 182-183.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Иванович Азовцев доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и устройства судна Морской государственной университет, 690003, г.Владивосток, ул. Верхнепортовая 50-а, e-mail: azovtsev@msun.ru

Anatoliy I. Azovtsev, Dr. Sci. (Eng)s, Professor, Professor of theory and construction of ships department Maritime state University named after admiral G.I. Nevelskoy. Verhneportovaya 50-a, st. Vladivostok 690003. Russian Federation, e-mail: azovtsev@msun.ru

Сергей Алексеевич Огай доктор технических наук, доцент кафедры теории и устройства судна Морской государственной университет, 690003, г.Владивосток, ул. Верхнепортовая 50-а. e-mail: ogay@msun.ru

Sergey A. Ogai Dr. Sci. (Eng)s, Professor, Professor of theory and construction of ships department Maritime state University named after admiral G.I. Nevelskoy. Verhneportovaya 50-a, st. Vladivostok 690003. Russian Federation, e-mail: ogay@msun.ru

Иван Сергеевич Карпушин кандидат технических наук, доцент заведующий кафедрой судовождения Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет. 690087, г.Владивосток, ул.Луговая, 52-б. e-mail: karpushin5@mail.ru

Ivan S. Karpushin, Ph.D. (Eng)s, assistant professor, Director of the navigation Department, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52-b, st. 690087, Russian Federation, e-mail: karpushin5@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.01.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 25.11.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.022>

Анализ аварийности малых судов как основа нормирования их безопасности

А.Г. Назаров¹ anmarineconsulting@ya.ru, С.Г. Назарова¹ svetnazar2015@gmail.com

¹АН Марин Консалтинг, г.Москва, Россия

Аннотация. Малые суда длиной до 24м широко используются для отдыха и коммерческой деятельности, однако не всегда технические требования к ним соответствуют размеру судов, что в конечном итоге приводит к их необоснованному удорожанию или невозможности постройки. Разработка нормативного регулирования для таких судов должна быть основана на анализе статистики аварийных происшествий, чтобы исключить наиболее опасные факторы. В работе выполнен анализ аварийности рекреационных судов в США, промысловых и коммерческих судов в Великобритании, а также маломерных судов в России. Определены уровни индивидуального риска. На основе анализа разработана матрицы рисков для разных типов судов, которые могут быть использованы при проектировании и при разработке нормативных документов.

Ключевые слова: малые суда, аварийность, нормирование

Для цитирования: Назаров А.Г., Назарова С.Г. Анализ аварийности малых судов как основа нормирования их безопасности, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 52—57.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.022>

Analysis of accidents with small craft as basis for their safety regulation

Albert G. Nazarov¹ anmarineconsulting@ya.ru, Svetlana G. Nazarova¹ svetnazar2015@gmail.com

¹ AN Marine Consulting, Moscow, Russian Federation

Abstract. Small craft up to 24 m in length are widely used for recreation and commercial activities, but the technical requirements for them do not always correspond to the size of the vessels, which ultimately leads to their unreasonable rise in price or impossibility of construction. The development of regulations for such vessels should be based on the analysis of accident statistics in order to prevent the most dangerous factors. The paper analyzes the accident rate of recreational vessels in the United States, fishing and commercial vessels in the UK, as well as small vessels in Russia. Levels of individual risk have been determined. Based on the analysis, risk matrices have been developed for different types of vessels that can be used in the design and development of regulatory documents.

Keywords: small craft, accident rate, regulations

For citation: Albert G. Nazarov, Svetlana G. Nazarova, Analysis of accidents with small craft as basis for their safety regulation, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 52—57.

Введение

Малые суда широко используются как для отдыха в качестве прогулочных (рекреационных), так и для коммерческой деятельности, перевозки пассажиров, служебных целей и рыболовного промысла (рис.1). В большинстве стран «малым судном» считается судно длиной до 24м, при этом с различиями в способах измерения длины и в количестве людей на борту. Морские администрации, как правило, предъявляют упрощенные требования к таким судам, преимущественно используемым в прибрежной зоне и имеющих небольшую пассажировместимость. В РФ, понятие «малое судно» закреплено в ряде нормативных документов, но ни Российским морским регистром судоходства (РС), ни Российским классификационным обществом (РКО) применительно к пассажирским и служебным судам оно не применяется. Существующая практика применения требований для «больших» судов к малым, без анализа реальных рисков, в конечном итоге провоцирует необоснованный рост стоимости и невозможность строить современные суда. Согласно данным Росстата, в РФ на 2022 год зарегистрировано всего 38 морских пассажирских судов, причем их

средняя пассажировместимость 107 человек, то есть речь идет о сравнительно небольших судах, из них 55% старше 30 лет. Таким образом, замена флота малых пассажирских судов является важной государственной задачей.

Анализ как общей статистики аварийности, так и отдельных аварий является неоценимым источником информации для совершенствования нормативных документов и методов проектирования судов [2]. Статистика по малым судам в РФ не всегда доступна, либо не сгруппирована по типам и размеру таких судов; также из-за их сравнительно небольшого количества судов она может оказаться недостаточно репрезентативной. В связи с этим, в настоящем исследовании рассматриваются также статистические данные по зарубежным судам.

В настоящей статье поставлена цель повышения безопасности малых судов, для чего решены задачи анализа количества аварий на совокупность флота судов для определения риска аварий, количества погибших и травмированных для определения уровней индивидуальных рисков, а также распределения по типам аварий для выявления наиболее существенных факторов безопасности и построения матрицы рисков.

Малые коммерческие суда в Юго-Восточной Азии

Принципиальное отличие Юго-Восточной Азии от РФ в том, что в первом случае имеет место недостаточное регулирование, во втором – избыточное регулирование малых судов, перевозящих пассажиров



Рис. 1. Малые суда по проектам АНМК а) алюминиевый пассажирский катамаран длиной 18м в (Таиланд) б) рекреационный катамаран из композитов длиной 12м (США)

В работе [1] одним из авторов выполнен анализ происшествий с малыми судами в Таиланде, где в 2012 году проблема с безопасностью туристов на водном транспорте получила большой общественный резонанс. Установлены три основные группы аварий: аварии скоростных пассажирских катеров, аварии водоизмещающих паромов местного сообщения, а также аварии, связанные с наездом на людей в воде. Очевидно, наибольшее число травм характерно для скоростных катеров, широко используемых для перевозки пассажиров; установлено, что в ходе столкновений таких судов травмы получают около 70% находящихся на борту людей. Наибольшее число погибших ассоциировано с опрокидыванием паромов, в основном, вследствие неправильной загрузки. По результатам исследований, были сформулированы и внедрены в практику Морского департамента Таиланда требования, касающиеся компоновки помещений на скоростных пассажирских судах и носовой повреждаемой зоны, что позволило в последующие годы снизить количество травм и погибших. В частности, запрещены сиденья в носовой повреждаемой зоне, а пассажирские сиденья ориентированы лицом по ходу движения (см.рис. 1а). Таким образом, путем не требующих дополнительных затрат изменений компоновки на

новых судах, оказалось возможным достичь существенного повышения безопасности в ее первостепенных аспектах [1].

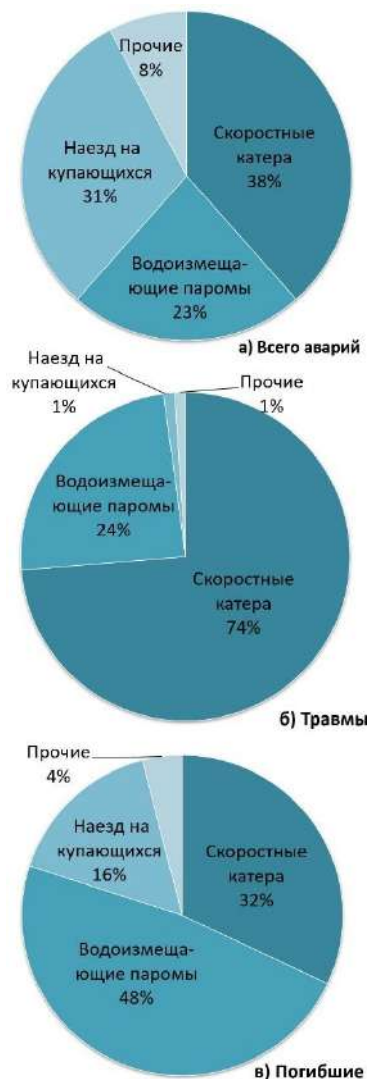


Рис. 2. Виды аварий малых коммерческих судов в Таиланде [1]

Рекреационные суда в США

Достаточно интересны данные USCG [3] для рекреационных судов в США, где аварийность оценивают исходя из количества аварий, травмированных и погибших на 100.000 судов; подобная методика не учитывает фактор интенсивности эксплуатации судов. Весьма вероятно (и это отмечают в [3]), что статистические данные по авариям со смертельным исходом являются более репрезентативными, т.к. не все случаи травм регистрируются как имеющие отношение к судам. Исходя из имеющихся данных, 64% аварий связаны с травмами, и в 15% аварий есть погибшие; по данным 2007-2020 годов соотношение погибших к травмированным составляет 0,23.

Состав флота определяет распределение типов аварий; в США большинство флота рекреационных судов составляют скоростные моторные лодки (рис.1б). Наиболее распространенная группа аварий в США связана со столкновениями с судами и объектами (более 40% - см.рис.3); по данным за 2020

год 22,3% столкновений связаны со смертельным исходом и имеется тенденция к росту. В целом, по данным 2019 год (до пандемии) число аварий составляет 35,1 и погибших 5,1 на 100.000 судов.

В США рекреационные суда являются вторым по уровню опасности видом транспорта после автомобильного. Довольно высокая аварийность объясняется следующими факторами: насыщенность водоёмов судами, длинная или круглогодичная навигация, отсутствие обязательной сертификации прогулочных судов, отсутствие обязательного лицензирования судоводителей прогулочных судов.

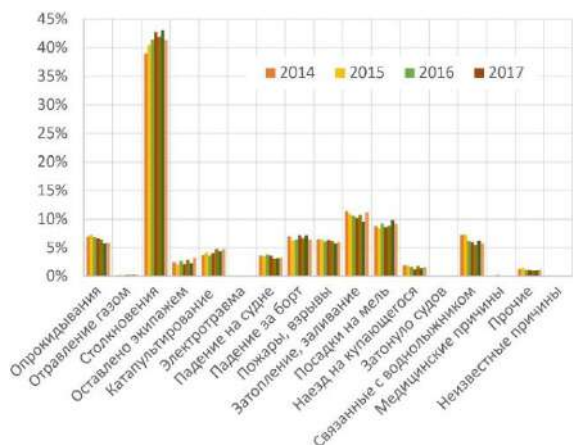


Рис. 3. Виды аварий рекреационных судов в США по данным USCG [3]

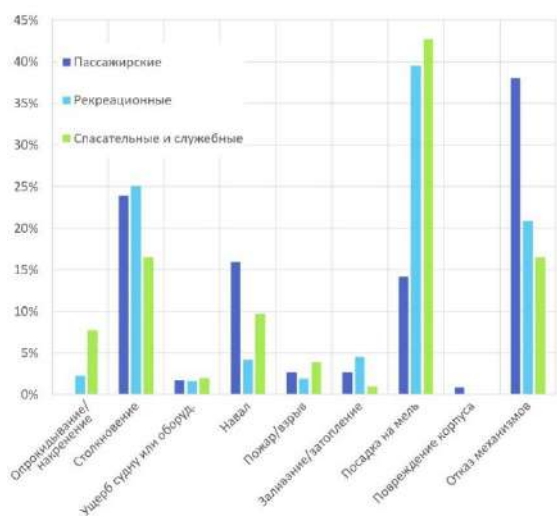


Рис. 4. Распределение по типам аварий малых судов в Великобритании [4]

Коммерческие суда в Великобритании

Британское агентство MAIB [4] приводит данные по авариям различных типов судов вместимостью до 100GRT; эти данные за 2015-2021 годы обработаны авторами на рис.4 на примере трех типов судов.

Характерно, что хотя рекреационные суда в среднем эксплуатируются менее интенсивно, чем коммерческие, для них характерен сравнительно высокий уровень аварийности, число травмированных (33,8% от числа аварий) и погибших (4,8%). Это можно связать с тем, что такие суда чаще

всего управляются непрофессиональными экипажами.

Примечательны данные по аварийности для спасательных и служебных судов, которые эксплуатируются в рискованной зоне во время выполнения функциональных обязанностей. Для них характерны высокое количество травм персонала (1,0% погибших и 45,6% травм от общего числа аварий соответственно) и посадки на мель.

Статистика показывает, что для малых пассажирских судов, которые регулируются MCA [5] с использованием упрощенных требований, обеспечен достаточно высокий уровень безопасности; за указанный период погибшие отсутствуют, а число травм составляет 24,0% от количества аварий. Для пассажирских судов, наиболее часто встречаются столкновения и навалы (учитывая частоту швартовки этих судов), а также отказы механизмов из-за интенсивности их эксплуатации. Заметно меньше распространение для пассажирских судов имеют пожары и затопления, в области маловероятных находятся опрокидывания и повреждения корпуса.

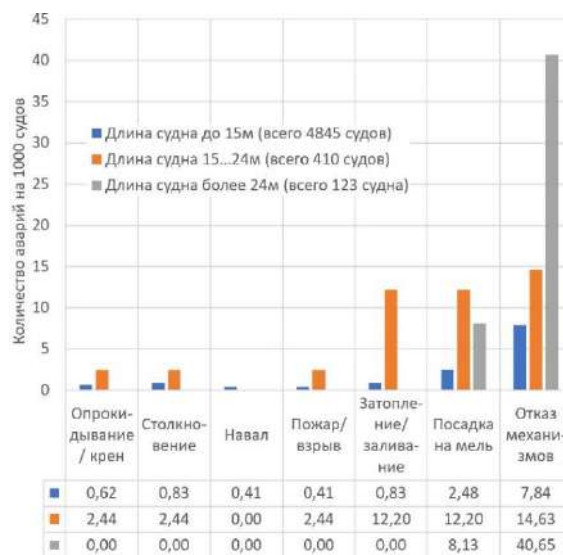


Рис. 5. Виды аварий рыболовных судов в Великобритании по длине судов [6]

Рыболовные суда в Великобритании

Из всех малых судов, рыболовные суда эксплуатируются наиболее интенсивно и подчас в сложных метеоусловиях; именно поэтому они являются наиболее опасной группой как по числу аварий, так и по степени индивидуального риска экипажей. Статистические данные по аварийности промысловых судов опубликованы в отчете MAIB [6]; обработка этих данных за 2021 год в зависимости от длины судна представлена на рис.5, где показано количество аварий на 1.000 судов. Наиболее значительная доля аварий соответствует отказам механизмов. Некоторая странность распределения аварийности между группами судов длиной до 15м и 15...24м свидетельствует о том, что на судах меньшей размерной группы, возможно, не все аварии регистрируются. В период с 1991 года ежегодная потеря рыболовного флота вследствие аварий составляет 3...5 единиц флота на 1000 судов.

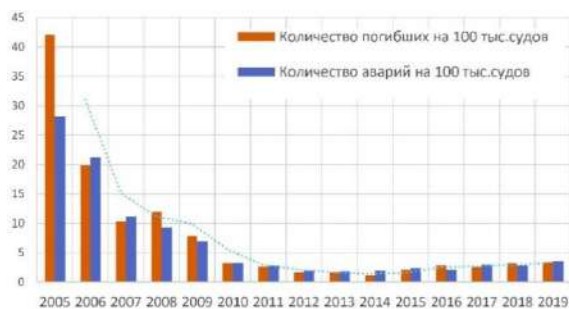


Рис. 6. Аварийность маломерных судов в РФ по данным ГИМС [7]

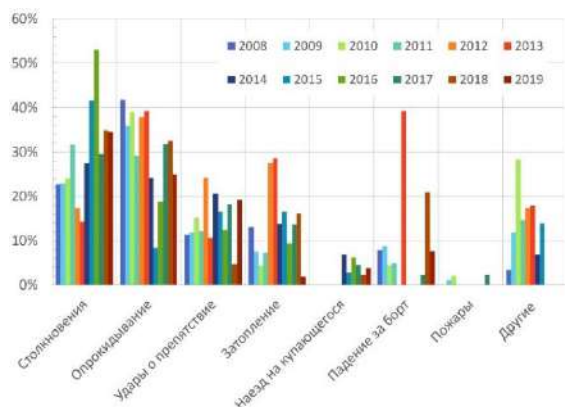


Рис. 7. Виды аварий маломерных судов в РФ по данным ГИМС [7]

Маломерные суда в РФ

В РФ, ГИМС МЧС [7] ежегодно публикует данные об аварийности маломерных судов (т.е. длиной до 20 м и вместимостью до 12 человек); анализ этих данных выполнен на рис.6 и 7. При общем снижении аварийности, налицо рост числа аварий, связанных со столкновениями, что может быть связано с увеличением доступности мощных двигателей и доли скоростных судов в составе флота. Характерными для РФ типами аварий (по сравнению с рекреационными судами в США) являются опрокидывания и затопления судов. Объяснить это можно тем, что в составе маломерного флота РФ имеется значительное количество судов, построенных еще по советским ГОСТ [8], требования которых являются заниженными по сравнению с современными стандартами, а целостность блоков плавучести на этих судах весьма сомнительна. Введение новых стандартов на базе ISO12217 [9] позволяет решить эту проблему, имеется тенденция к снижению доли опрокидываний

Индивидуальные риски и матрицы рисков

На основе обработанных данных, определены уровни индивидуального риска в виде вероятности фатального исхода (табл.1). При оценке индивидуального риска, среднее количество людей на рекреационном или маломерном судне принято

равным двум. Кроме того, учтено, что активная навигация маломерных судов в РФ длится полгода. С учетом этих допущений, уровни индивидуального риска для рекреационных судов в США и маломерных в РФ оказываются очень близкими. Уровень рисков в целом близок к допустимым для морской отрасли и промышленности [2]. Исходя из данных в табл.1, повышенное внимание следует уделить безопасности экипажей рыболовных судов.

На основе проведенного анализа выполнена оценка уровней риска аварий на малых судах разных типов и разработаны матрицы рисков; пример представлен на рис.8 для малого пассажирского судна. Принцип построения таблицы в целом следует руководству IMO FSA [10], однако учтен различный уровень профессиональных рисков экипажа (в т.ч. людей на рекреационном судне) и пассажиров. Также, добавлен уровень событий «не отображается в статистике, но прогнозируется как возможное», которые покрывают события отсутствующие в статистике аварий, но теоретически возможные.

Таблица 1

Уровни индивидуального риска фатального исхода

Тип судов	Вероятность фатального исхода, в год	Примечание
Маломерные и рекреационные суда	$3,0 \times 10^{-5}$	Допустимый
Пассажирские суда	$1,0 \times 10^{-5}$	Пренебрежимо малый
Экипажи рыболовных судов	$1,0 \times 10^{-3}$	Максимально допустимый для работников

Следует отметить, что малые суда рассматриваются прежде всего в контексте риска для жизни и здоровья людей, а также ущерба окружающей среде. Стоимость потери человеческой жизни оценивается 3,1 млн. евро в странах ЕС (рекомендации Еврокомиссии) и 5,8 млн. долларов в США (рекомендации Министерства транспорта) [2], что как правило превышает стоимость малого судна. Таким образом, по сравнению с двумя предыдущими факторами, потеря малого судна или потеря груза не являются приоритетными и могут не рассматриваться.

Заключение

Наибольшее количество погибших ассоциируется с авариями, связанными с опрокидыванием судов. Этот вид аварии происходит стремительно и вызывает катастрофические последствия. Подобные аварии могут иметь значительный социальный эффект; усугубляется ситуация отсутствием контроля за загрузкой малых пассажирских судов. Решение видится в развитии судов катамаранного типа, для которых подобный тип аварии практически не характерен.

	Последствия >	Незначительные происшествия RI=1	Происшествие RI=2	Авария RI=3	Серьезная авария RI=4	Катастрофа RI=5
Вероятность реализации	Действие на судно и людей > Частота появления, судов в год	Единичная травма или многочисленные легкие травмы Повреждение оборудования	Серьезная травма или многочисленные травмы Незначительное повреждение судна	Погибший член экипажа или многочисленные серьезные травмы Значительное повреждение судна	Несколько погибших членов экипажа или многочисленные серьезные травмы или гибель пассажира Значительное повреждение или гибель судна	Множество погибших пассажиров Гибель судна
Часто FI=5	Происходит регулярно на судне каждый месяц F=10	Отказ механизмов				
Вероятно FI=4	Происходит раз в год на одном из 10 судов F=10 ⁻¹	Персональная травма	Посадки на мель Навал Отказ главных механизмов	Падение за борт		
Возможно FI=3	Происходит раз в год на одном из 1000 судов F=10 ⁻³		Повреждения корпуса	Заливание/ затопление	Столкновение	
Маловероятно FI=2	Происходит за время службы судна (20 лет) на одном из 5000 судов F=10 ⁻⁵				Пожары/взрывы	Опрокидывание
Очень маловероятно FI=1	Не отображается в статистике, но прогнозируется как возможное			Попадание молнии	Пандемия	Террористический акт Боевые действия

Рис. 8. Матрица рисков для малых пассажирских судов

FI – фактор вероятности события, RI – фактор последствий. Красный цвет соответствует неприемлемому уровню риска, зеленый – низкому уровню риска

Наибольшее количество травм (включая гибель людей) ассоциируется со столкновениями судов. С ростом скоростей движения и увеличением интенсивности движения водного транспорта этот вид аварий будет становиться все более вероятным. Повышение безопасности видится в совершенствовании требований к компоновке таких судов, с избежанием размещения пассажиров в потенциально повреждаемых при столкновении зонах.

В сводках ГИМС последних лет практически исчезли сведения о пожарах на маломерных судах. В то же время, в статистике USCG и MAIB этот тип аварий присутствует, особенно на судах с бензиновыми двигателями и обитаемых судах.

Интересно отметить, что в статистике ГИМС РФ количество аварий близко к количеству погибших. Зарегистрированное количество травм зачастую меньше количества погибших, в то время как в США для рекреационных судов это соотношение составляет 4:1. Указанные особенности свидетельствуют о том, что, вероятно, в РФ в поле зрения надзорных органов попадают лишь аварии, повлекшие гибель людей. В целом, судя по рис.6 с начала 2000-х ГИМС РФ проделал большую работу

по снижению аварийности судов и предъявляемые технические требования в целом адекватны; дополнительного внимания требует нормирование остойчивости и непотопляемости.

В настоящее время в РФ не существуют каких-либо упрощенных правил для малых морских коммерческих судов, не совершающих международных рейсов. Результаты применения правил МСА [5] для пассажирских судов длиной до 24м, в частности в Великобритании, убедительно свидетельствуют, что при используемых ограничениях в районе плавания и пассажирсовместимости безопасность может быть обеспечена при применении упрощенных технических требований к этим судам. С точки зрения решения государственных задач развития транспорта и туризма и необходимости пополнения флота, требования в РФ для судов, не совершающих международных рейсы должны быть усовершенствованы [11].

Выполненный в настоящей работе анализ аварийности и рисков в дальнейшем использован для обоснования нормативных предложений для РС и РКО, относящихся к техническим требованиям к малым судам различного назначения.

Литература

1. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and Safety of Small Passenger Craft: Some Lessons// 5th Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2016.
2. Егоров Г.В., Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. СПб., изд. «Судостроение», 2007, 384с.
3. Recreational Boating Statistics. COMDTPUB P16754.34 U.S. Department of Homeland Security U.S. Coast Guard Office of Auxiliary and Boating Safety, 2020.
4. Marine Accident Recommendations and Statistics, MIAB Annual Report, 2021.
5. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.

6. Analysis of UK Fishing Vessel Safety 1992 to 2006, MIAB, 2008.
7. Анализ деятельности по обеспечению безопасности людей на водных объектах. Управление безопасности людей на водных объектах. ГИМС МЧС России, Москва, 2019.
8. ГОСТ 19356-79. Суда прогулочные гребные и моторные. Методы испытаний. Издательство стандартов, Москва, 1980.
9. ГОСТ ISO 12217-1- 2016. Суда малые. Оценка остойчивости, запаса плавучести и определение проектной категории. Издательство Стандартиформ, Москва, 2017.
10. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 9 April 2018
11. Назаров А.Г. Проблемы совершенствования подходов к конструктивной противопожарной защите судов из композиционных материалов. Научные проблемы водного транспорта, №71(2),2022. с.74-84.

References

1. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and Safety of Small Passenger Craft: Some Lessons// 5th Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2016.
2. Egorov G.V., Proektirovanie sudov ogranichennyh rajonov plavaniya na osnovanii teorii riska. [Design of vessels in restricted navigation areas based on risk theory]. SPb., izd. «Sudostroenie», 2007, 384p
3. Recreational Boating Statistics. COMDTPUB P16754.34 U.S. Department of Homeland Security U.S. Coast Guard Office of Auxiliary and Boating Safety, 2020.
4. Marine Accident Recommendations and Statistics, MIAB Annual Report, 2021.
5. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.
6. Analysis of UK Fishing Vessel Safety 1992 to 2006, MIAB, 2008.
7. Analiz dejatel'nosti po obespecheniju bezopasnosti ljudej na vodnyh objektah. Upravlenie bezopasnosti ljudej na vodnyh objektah. [Analysis of activities to ensure the safety of people in water objects. Directorate of Human Safety on Water Objects]. GIMS MChS Rossii, Moskva, 2019.
8. ГОСТ 19356-79. Суда прогулочные гребные и моторные. Методы испытаний. [Pleasure rowing and motor vessels. Test methods]. Izdatel'stvo standartov, 1980.
9. ГОСТ ISO 12217-1- 2016. Суда малые. Оценка остойчивости, запаса плавучести и определение проектной категории. [Small vessels. Assessment of stability, buoyancy reserve and determination of the design category]. Izdatel'stvo Standartinform, Moskva, 2017.
10. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 9 April 2018
11. Nazarov A.G. Problemy sovershenstvovaniya podhodov k konstruktivnoj protivopozharnoj zashhite sudov iz kompozitsionnyh materialov. [Problems of improvement of approaches to structural fire protection of ships in composite materials]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, №71(2),2022. p.74-84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Светлана Георгиевна Назарова, специалист по контролю качества конструкторского бюро «АН Марин Консалтинг», 107113, Москва, ул. Шумкина, д.20, с.1, офис 501/502, e-mail: svetnazar2015@gmail.com

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

Svetlana G. Nazarova, quality control specialist of the design bureau "AN Marine Consulting", Shumkina str., 20, p.1, office 501/502, Moscow, 107113, Russian Federation, e-mail: svetnazar2015@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 26.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 681.5.07:007.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.023>

Динамика речного водоизмещающего судна вблизи границы области устойчивости

А.В. Чернышов¹, e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com

¹Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрена динамика речных водоизмещающих судов на границе области устойчивости. Приведен оригинальный графический способ определения значения параметра (глубины фарватера), при котором объект управления теряет устойчивость. Проведен анализ характера устойчивости особой точки, в результате которого был сделан вывод о собственной устойчивости судна на границе области устойчивости. Показана трансформация фазовых портретов системы при движении судна на разных глубинах. Полученные результаты качественно дополняют и, частично, вносят коррективы в существующие представления о динамике речных судов при движении по мелководью. Результаты исследования будут полезны при проектировании судов, а также при разработке алгоритмов управления при движении по опасным участкам рек, что, в итоге, способствует снижению аварийности на водном транспорте.

Ключевые слова: устойчивость состояния равновесия, устойчивость на курсе, аварии на транспорте.

Для цитирования Чернышов А.В. Динамика речного водоизмещающего судна вблизи границы устойчивости, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 58—63.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.023>

Dynamics of a river displacement vessel in the course stability neighborhood

Andrey V. Chernyshov¹ e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com

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

Abstract. The paper considers the dynamics of river displacement vessels at the boundary of the course stability area. An innovative graphical method for determining the value of the parameter (navigational depth), at which the control object loses course stability, is presented. Analysis of the character of stability of a equilibrium point is conducted, as a result of which a conclusion about inherent stability of a vessel on the border of the stability area is made. Transformation of phase portraits of system at vessel movement on different navigational depths is shown. Received results are qualitatively supplementing and, partially, correcting basic ideas about dynamic of river ships moving through shallow water. Results of research will be useful at designing of ships, and also at development of control algorithms during shallow water navigation. Also, the results shown in the article make a positive contribution to the decreasing of navigational accidents.

Key words: equilibrium point stability, course stability area, navigational accidents.

For citation: Andrey V. Chernyshov, Dynamics of a river displacement vessel in the course stability neighborhood, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 58—63.

Введение

Особенности движения речного судна по внутренним водным путям таковы, что возможна ситуация, когда значение глубины фарватера h такое, что объект достаточно долгое время находится на границе области устойчивости. Алгоритм управления должен четко реагировать на изменяющуюся динамику и соответствующим образом подстраивать коэффициенты. Если выбранный набор коэффициентов не соответствует текущему характеру устойчивости стационарной точки, то качество управления серьезно снижается. При движении по опасным судоходным участкам (каналы, подходы к шлюзам, пролеты мостов) неверная оценка динамики судна может привести к навигационной аварии. Рассмотрим, для примера, следующую ситуацию: судно прямолинейно

движется по каналу, имеющего глубину h_N . На таких участках водных путей рельеф дна ровный, без резких перепадов. Вполне вероятно, что глубина h_N будет определять границу устойчивости стационарной точки, то есть, например, случай одного нулевого корня характеристического уравнения. Алгоритм управления должен учитывать качественный характер устойчивости такого состояния равновесия. Например, если стационарная точка имеет характер устойчивого узла, то система при малых изменениях параметра будет вести себя как устойчивая, соответственно и коэффициенты алгоритма управления должны быть подобраны именно как для устойчивой системы. Или же наоборот, если мы определили, что стационарное состояние объекта на границе устойчивости имеет

характер седла, то и набор коэффициентов алгоритма должен соответствовать этому.

История исследования вопроса устойчивости

Вопрос качественной оценки характера устойчивости особой точки тесно связан с исследованием фазовых траекторий или, как принято говорить, фазового портрета системы. Теоретические вопросы исследования особенностей фазовых портретов динамических систем для случаев чисто мнимых корней характеристического уравнения или для случая одного нулевого корня подробно рассмотрены в [1, 2] и в других. Методы качественного исследования фазовых портретов в зависимости от параметра широко освещены в [3].

При исследовании динамики судов устойчивость, традиционно, рассматривается в разрезе исследования управляемости. Результаты исследования управляемости речных судов, с использованием линеаризованных моделей, достаточно широко представлены в литературе по теории корабля [4, 5, 6, 7, 8]¹. Исследование особенностей динамики речных судов, вызванных наличием нелинейности, можно найти в работах [9, 10, 11]. Несмотря на обширный интерес к динамике судов, исследование устойчивости в случае одного нулевого корня подробно не рассматривалось ранее. Выводы относительно характера переходных процессов в этом режиме, сделанные в некоторых источниках, не подкреплены теорией.

Математическая модель

Рассмотрим математическую модель, которая описывает динамику речных водоизмещающих судов [5]:

$$\begin{cases} \frac{d\beta_d}{dt} = A\beta_d + B\omega + S_\beta U + P(\beta_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = C\beta_d + D\omega + S_\omega U \end{cases}, \quad (1)$$

где $P(\beta_d) = H\beta_d|\beta_d|$, $A, B, C, D, H, S_\beta, S_\omega \in R$ - гидродинамические коэффициенты, зависящие от геометрии корпуса и рулей, внешних условий, линейной скорости, β_d, ω - фазовые координаты (β_d - угол дрейфа, ω - угловая скорость), U - угол поворота руля ($U \in [-35^\circ, +35^\circ]$).

Из теории корабля известно, что математическая модель выводится из дифференциальных уравнений движения судна в горизонтальной плоскости при условии постоянства внешней среды и линейной скорости. В то же время, дифференциальные уравнения движения корабля выводятся из выражений гидродинамических сил и моментов записанных в осях связанных с центром масс судна G (Рис.1) [7]:

$$\begin{cases} \rho V(1+k_{22})\frac{dv_y}{dt} - \rho V(1+k_{11})v_x\omega = -Y + \sum_{i=1}^{Z_p} \bar{Y}_{R_i} \\ -I_Z(1+k_{66})\frac{d\omega}{dt} = M - l_R \sum_{i=1}^{Z_p} \bar{Y}_{R_i} \end{cases} \quad (2)$$

где k_{11}, k_{22}, k_{66} - коэффициенты присоединенных масс.

v - линейная скорость, L - длина корпуса,

ρ - плотность воды, V - объемное водоизмещение;

I_Z - момент инерции относительно оси z ,

$I_Z \approx 0.05\rho VL^2$ [7];

M - гидродинамический момент,

$M = C_m \frac{\rho v^2}{2} L^2 T$;

C_m - коэффициент гидродинамического момента; T - осадка;

l_R - расстояние от центра масс до баллера руля;

Y - боковая составляющая результирующего вектора гидродинамических сил, $Y = C_Y \frac{\rho v^2}{2} LT$;

C_Y - коэффициент боковой составляющей результирующего вектора гидродинамических сил;

\bar{Y}_{R_i} - боковая сила на руле; Z_p - число рулей.

Составляющие вектора линейной скорости вычисляются при помощи следующих выражений: $v_x = v \cos \beta_d$, $v_y = v \sin \beta_d$.

На практике, значение угла дрейфа β_d находится в интервале $(-15^\circ, +15^\circ)$, следовательно, мы можем применить следующие допущения: $\cos \beta_d \approx 1$, $\sin \beta_d \approx \beta_d$.

Таким образом, получим следующие выражения из (2):

$$\begin{cases} \rho V(1+k_{22})v \frac{d\beta_d}{dt} - \rho V(1+k_{11})v\omega = -Y + \sum_{i=1}^{Z_p} \bar{Y}_{R_i} \\ -I_Z(1+k_{66})\frac{d\omega}{dt} = M - l_R \sum_{i=1}^{Z_p} \bar{Y}_{R_i} \end{cases} \quad (3)$$

Выражения для приближенного вычисления коэффициентов присоединенных масс k_{11}, k_{22}, k_{66} могут быть найдены по формулам из [12]. Также известно, что коэффициенты сил и моментов C_Y и C_m нелинейно зависят от кинематических

¹ В теории корабля устойчивость в смысле Ляпунова принято называть *теоретической устойчивостью*.

характеристик движения корабля. В соответствии с [4], мы можем приближенно записать:

$$C_Y = c_1\omega + c_2\beta_d + c_3\beta_d|\beta_d|;$$

$$C_m = m_1\omega + m_2\beta_d,$$

где c_i, m_j - коэффициенты, зависящие от формы корпуса и глубины фарватера.

Таким образом, используя вышеуказанные допущения, мы можем упростить (3) путем введения гидродинамических коэффициентов, которые, по сути, являются функциями геометрии корпуса, рулей, внешних условий (глубины фарватера) и линейной скорости¹. Важно отметить характерную особенность коэффициентов $A, B, C, D, H, S_\beta, S_\omega$ математической модели (1): коэффициенты A, D, H - всегда отрицательные, а B, C, S_β, S_ω - всегда положительные [7].

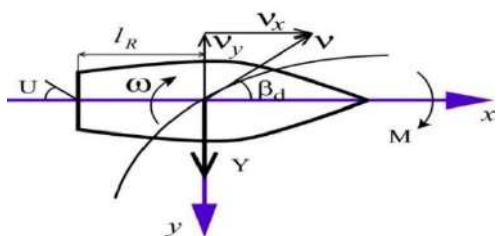


Рис. 1. Боковая сила и гидродинамический момент воздействующие на корпус в процессе движения по криволинейной траектории

Характер устойчивости особой точки для случая одного нулевого корня

Принципиальным условием теоретической устойчивости судна на курсе является отсутствие циркуляции конечного радиуса при его движении с неотклоненным рулем [4, стр. 361]. Следуя этому очевидному условию, в данной работе будем рассматривать собственные движения системы.

Система (1) для случая неотклоненного руля запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\beta_d}{dt} = A\beta_d + B\omega + P(\beta_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = C\beta_d + D\omega \end{cases}, \quad (4)$$

Характеристическое уравнение системы (4) $\lambda^2 - \sigma\lambda + \Delta = 0$, где

$$\sigma = A \pm 2H\beta_d + D, \quad \Delta = \begin{vmatrix} A \pm 2H\beta_d & B \\ C & D \end{vmatrix}.$$

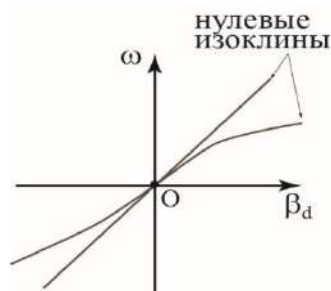
Уравнения нулевых изоклин:

$$\begin{cases} \omega = -\frac{A\beta_d + H\beta_d|\beta_d|}{B} \\ \omega = -\frac{C\beta_d}{D} \end{cases}. \quad (5)$$

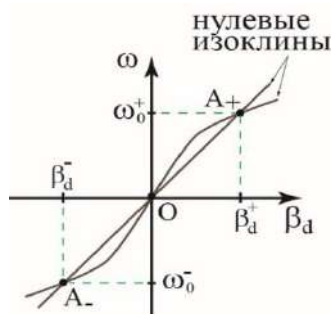
Преобразуем (5) с учетом $\Delta_0 = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$:

$$(\Delta_0 + HD\beta_d|\beta_d|)\beta_d = 0,$$

У системы (4), в точке O с координатами $\beta_d = 0, \omega = 0$ всегда существует состояние равновесия. Если $\Delta_0 > 0$, то состояние равновесия одно.



а) $\Delta_0 > 0$



б) $\Delta_0 < 0$

Рис. 2. Число состояний равновесия в зависимости от коэффициентов математической модели: а) одна стационарная точка; б) три стационарные точки.

При $\Delta_0 < 0$ появляются еще два стационарных состояния²: в точках $A_+(\beta_d^+, \omega_0^+)$ и $A_-(\beta_d^-, \omega_0^-)$, где $\beta_d^+ = -\frac{\Delta_0}{HD}, \omega_0^+ = \frac{\Delta_0 C}{HD^2}$ и $\beta_d^- = \frac{\Delta_0}{HD}, \omega_0^- = -\frac{\Delta_0 C}{HD^2}$ (рис.2). Кратность особой точки нулевых изоклин равна 3.

Гидродинамические коэффициенты модели (4) имеют неявную зависимость от параметра h , поэтому, на практике, для нахождения значений, обеспечивающих выполнение условий $\sigma_0 \neq 0, \Delta_0 = 0$, предлагается использовать метод, впервые предложенный в [13]. Суть метода

¹ Гидродинамические коэффициенты могут быть вычислены либо по формулам из [7], либо по результатам натурных испытаний.

² HD всегда больше нуля.

заключается в следующем: рассмотрим плоскость с прямоугольными декартовыми координатами σ_0, Δ_0 , где $\sigma_0 = A + D$. Отметим на ней области, соответствующие различным состояниям равновесия точки O системы (4), как это делалось в [1]. Отметим на этой плоскости точки $h_i(\sigma_0, \Delta_0)$, координаты которых вычисляются при конкретных значениях глубины. Соединив точки, получим кривую l , которая пересекает ось $O\sigma_0$ в точке N (рис.3). Кривая l - траектория условной изображающей точки на плоскости σ_0, Δ_0 , полученная при движении судна по фарватеру с глубиной, изменяющейся в диапазоне от h_1 до h_4 ¹, где $h_1 < h_2 < h_N < h_3 < h_4$. Значение параметра h_N , соответствующее точке N , будет обеспечивать выполнение условия $\sigma_0 \neq 0, \Delta_0 = 0$ ². Для данной динамической системы случай двух чисто мнимых корней ($\sigma_0 = 0$) исключен из физических соображений, поэтому пересечения кривой l с осью $O\Delta_0$ не будет.

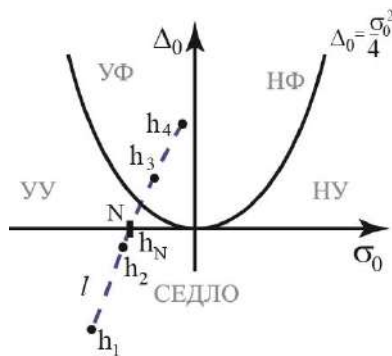


Рис.3. Траектория (l) условной изображающей точки на плоскости σ_0, Δ_0 , полученная при движении судна по фарватеру с глубиной, изменяющейся в диапазоне от h_1 до h_4 . Области, характеризующие тип устойчивости состояния равновесия: УУ-устойчивый узел, УФ – устойчивый фокус, НФ-неустойчивый фокус, НУ – неустойчивый узел.

Наличие модуля в выражении $P(\beta_d) = H\beta_d|\beta_d|$ вызывает определенную трудность для качественного анализа динамики системы. Будем использовать функцию $P^*(\beta_d) = H\beta_d^3$ вместо функции $P(\beta_d) = H\beta_d|\beta_d|$. Правомерность такой замены объясняется тем, что кратность общей точки O изоклин системы (4) при переходе от $P(\beta_d)$ к $P^*(\beta_d)$ не изменяется и равна 3. Если не вводить замену и рассматривать $P(\beta_d) = H\beta_d|\beta_d|$ как $P(\beta_d) = \pm H\beta_d^2$, то смена устойчивости будет осуществляться через негрубую особую точку –

седлоузел, с кратностью 2, что не совпадает с кратностью общей точки изоклин, которая равна 3.

Для анализа устойчивости особой точки удобно привести систему (4) к каноническому виду:

$$\begin{cases} \frac{d\beta_d}{dt} = \lambda_1\beta_d + \tilde{P}^*(\beta_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = \lambda_2\omega \end{cases} \quad (6)$$

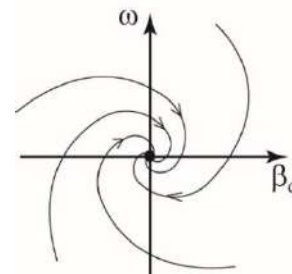
В точке N один из корней характеристического уравнения (λ_1) равен нулю. В итоге, система (6) запишется так:

$$\begin{cases} \frac{d\beta_d}{dt} = \tilde{P}^*(\beta_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = \lambda_2\omega \end{cases},$$

где $\tilde{P}^*(\beta_d) = \Delta_m\beta_d^m + \dots$ - ряд, начинающийся с нечетной ($m = 3$) степени.

Состояние равновесия имеет характер узла [3], так как $m = 3$ нечетное и $\Delta_m = H < 0$. Устойчивость узла³ определяется знаком корня λ_2 : при $\lambda_2 < 0$ - узел устойчивый, при $\lambda_2 > 0$ - неустойчивый. Знак λ_2 совпадает со знаком σ_0 , который всегда меньше нуля, поэтому характер устойчивости стационарной точки - устойчивый узел.

При движении речного судна с большей глубины на меньшую фазовые портреты будут изменяться, как показано на рис 4. При глубине больше h_N ($\Delta_0 > 0$) на фазовом портрете наблюдается одно устойчивое грубое состояние равновесия, то есть судно обладает собственной устойчивостью. С точки зрения управления – это наиболее безопасный режим. При $\Delta_0 = 0$ (в малой окрестности глубины h_N) грубое устойчивое состояние – сложный устойчивый узел. В данном случае система ведет себя как устойчивая, однако дальнейшее уменьшение глубины приводит к тому, что сложный узел распадается на 3 грубых состояния: седло и два устойчивых узла.

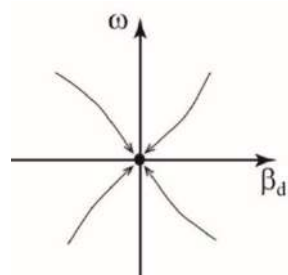


а) устойчивый фокус

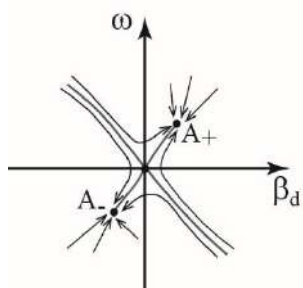
¹ Расположение кривой l уникально для корпусов разной формы.

² Предлагаемый метод позволяет найти диапазон глубин, внутри которого находится значение h_N .

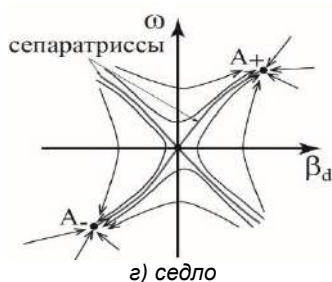
³ В специальной литературе это состояние равновесия называется *сложный узел*.



б) устойчивый узел (расположение траекторий для сложного узла не отличается от устойчивого узла)



в) седло



г) седло

Рис. 4. Фазовые портреты системы при различных глубинах фарватера а) h_4 , б) h_3 , h_N в) h_2 , г) h_1 .

В этом случае судно становится неустойчивым. При плавном уменьшении глубины потеря устойчивости происходит медленно. Такое медленное изменение должен "почувствовать" алгоритм управления и вовремя перестроить коэффициенты. При обратном увеличении глубины устойчивость возвращается. В этом случае говорят, что система ведет себя *обратно* [14]. Очевидно, что желательно избегать длительного движения судов в условиях, при которых происходит постоянная смена характера устойчивости состояния равновесия. Поэтому, на этапе проектирования, необходимо рассчитать "критическое" значение глубины и проектировать корпус таким, чтобы это значение не совпадало с глубинами на опасных участках рек (каналы, пролеты мостов, подходы к шлюзам).

Заключение

Глубина фарватера существенно влияет на особенности динамики речного судна. С точки зрения устойчивости движения для каждого корпуса судна существует ее "критическое" значение, определяющее границу устойчивости, при которой происходит смена типа устойчивости состояния равновесия. Вблизи границы устойчивости состояния равновесия имеет характер устойчивого узла, и судно ведет себя как устойчивое. При разработке алгоритмов управления необходимо учитывать эту особенность динамики речного судна с целью своевременной подстройки коэффициентов.

Литература

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Физматгиз – 1959. 916 с.
2. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. – М.: Наука – 1967. 487 с.
3. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. – М.: Наука – 1976. 495 с.
4. Павленко В.Г. Ходкость и управляемость судов. - М: Транспорт, 1991. – 397с.
5. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1987 - 274 с.
6. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания. Л: Судостроение, 1971 – 256 с.
7. Войткунский Я.И. Управляемость водоизмещающих судов: Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский - Л.: Судостроение, 1985. Т. 3. С. 544.
8. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения (гидродинамика криволинейного движения и регулирование курса). Л: Судостроение, 1971 – 478 с.
9. Фейгин М.И., Чиркова М.М. О существовании области пониженной управляемости для судов, неустойчивых на прямом курсе // Известия Академии Наук СССР. Механика твердого тела. 1985 (№.2). С. 73-78
10. Чернышов А.В., Чиркова М.М. Статико-динамические особенности водоизмещающих судов // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. 2003 (№.4). С. 153-158
11. Chernyshov A.V., Chernyshova S.A. A method of investigating the phenomenon of bifurcation memory in the dynamics of river vessels // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2022. vol.18. no.2. pp. 171-181.
12. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М: Транспорт, 1977. – 456 с.
13. Чернышов А.В. Графические критерии собственной устойчивости судна на мелководье // Морские интеллектуальные технологии. 2021. №3 (том 1). С. 215-219.
14. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости (изд. 2-ое, переработанное). – М.: Наука – 1984. 176 с.

References

1. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaykin S.E. Teoriya kolebaniy [Oscillation Theory], M.: Fizmatgiz, 1959. 916 s.
2. Andronov A.A., Leontovich E.A., Gordon I.I., Majer A.G. Teoriya bifurkacij dinamicheskikh sistem na ploskosti [Bifurcation theory of dynamical systems on the plane], M.: Nauka, 1967. 487 s.
3. Bautin N.N., Leontovich E.A. Metody i priemy kachestvennogo issledovaniya dinamicheskikh sistem na ploskosti [Methods and techniques for qualitative study of dynamical systems on the plane], M.: Nauka, 1976. 495 s.
4. Pavlenko V.G. Khodkost' i upravlyaemost' sudov [Navigability and controllability of ships], M: Transport, 1991, 397s.
5. Pershits R.Ya Upravlyaemost' i upravlenie sudnom [Controllability and control of the ship], L.: Sudostroenie, 1987, 274 s.
6. Gofman A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya [Theory and Calculation of Inland Navigation Vessel Turnability]. L: Sudostroenie, 1971, 256 s.
7. Voytkunskiy Ya.I. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchikh sudov: Spravochnik po teorii korablya [Steering of Displacement Ships: Handbook of Ship Theory], L.: Sudostroenie, 1985. T. 3. S. 544.
8. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya (gidrodinamika krivolinejnogo dvizheniya i regulirovanie kursa) [Ship steering and navigation automation (hydrodynamics of curvilinear navigation and course control)], L: Sudostroenie, 1971, 478 s.
9. Fejgin M.I., Chirkova M.M. O sushchestvovanii oblasti ponizhennoj upravlyaemosti dlya sudov, neustojchivyh na pryamom kurse [On the existence of an region of reduced controllability for ships unstable on a straight course], Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela. 1985 (№.2). S. 73-78
10. Chernyshov A.V, Chirkova M.M.. Statiko-dinamicheskie osobennosti vodoizmeshchayushchix sudov [Static-dynamic properties of displacement vessels], Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i sistemy` upravleniya. 2003 (№.4). S 153-158
11. Chernyshov A.V., Chernyshova S.A. A method of investigating the phenomenon of bifurcation memory in the dynamics of river vessels, Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2022. vol.18. no.2. pp. 171-181.
12. Basin A.M. Khodkost' i upravlyaemost' sudov [Navigability and controllability of ships], M: Transport, 1977, 456 s.
13. Chernyshov A.V. Graficheskie kriterii sobstvennoj ustojchivosti sudna na melkovod'e [Graphical criteria of inherent stability of river vessels for the case of shallow waters navigation], Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. №3 (part 1). S .215-219.
14. Bautin N.N. Povedenie dinamicheskikh sistem vblizi granic oblasti ustojchivosti (izd. 2-nd, pererabotannoe) [Dynamics of systems near the boundaries of the stability region], M.: Nauka, 1984. 176 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владимирович Чернышов, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, энергетики, математики и информационных систем, Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева, 603095, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com

Andrey V. Chernyshov, Ph.D. (Eng)s, assistant professor of the Department of Automation, Electroenergetics, Mathematics and Information systems, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 26.10.2022.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

Научная статья

УДК 347.799.13

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.024>

Влияние ширины и глубины канала на динамическую просадку

А.В. Филь¹ fil@iwtsedov.ru, О.Ю. Лебедев² olegbleb@yandex.ru, Д.Ю. Рыбников² dmitry2012@yandex.ru.

¹Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова, ²Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В данной статье рассмотрен вопрос влияния ширины и глубины канала на динамическую просадку судна, который является весьма актуальным, особенно при движении судов в стесненных условиях фарватера по ширине. Обосновывается важность разработки новых методов для оценки безопасного плавания в стесненных условиях, из-за тенденции постоянного увеличения главных размерений вновь строящихся судов. Так же разработка нового метода расчета обусловлена тем, что существующие формулы рассчитаны для судов старой постройки, с традиционными формами кормы (остроносой), и не учитывают наличие носового бульба или больших коэффициентов общей полноты, которые свойственны судам новой постройки. Произведен краткий обзор и анализ существующих и наиболее распространенных способов расчета изменения посадки судна в стесненных условиях, которые применяются судоводителями в рейсе, указаны их несовершенства. На основе уже имеющихся исследований и формул, была выведена эмпирическая формула для расчета просадки судов, которая в полной мере отражает картину движения судна на мелководье и поможет применяться судоводителями во время работы.

Ключевые слова: безопасность движения, посадка судна, канал, анализ, управляемость судов и составов на мелководье, новый подход, суда речного флота.

Для цитирования: Филь А.В., Лебедев О.Ю., Рыбников Д.Ю. Влияние ширины и глубины канала на динамическую просадку, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 64—67.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.024>

Influence of the width and depth of the channel on the dynamic landing of the vessel

Alexander V. Fil¹ fil@iwtsedov.ru, Oleg Yu. Lebedev² olegbleb@yandex.ru,
Dmitry Yu Rybnikov² dmitry2012@yandex.ru.

¹ Institute of Water Transport named after G.Ya. Sedova, Russian Federation, ²Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. This article considers the issue of the influence of the width and depth of the channel on the dynamic drawdown of the vessel, which is very relevant, especially when ships move in cramped conditions of the fairway in width. The importance of developing new methods for assessing safe navigation in wall conditions is substantiated, due to the tendency of a constant increase in the main dimensions of newly built vessels. Also, the development of a new calculation method is due to the fact that the existing formulas are calculated for ships of old construction, with traditional forms of stern (sharp-nosed), and do not take into account the presence of a bow bulba or large coefficients of overall completeness, which are characteristic of ships of new construction. A brief overview and analysis of the existing and most common methods of calculating changes in the landing of a vessel in cramped conditions, which are used by boatmasters on a voyage, is made, their imperfections are indicated. Based on existing studies and formulas, an empirical formula for calculating drawdown was derived.

Key words: traffic safety, landing of the ship, channel, analysis, controllability of ships and convoys in shallow water, new approach, river fleet ships.

For citation: Alexander V. Fil, Oleg Yu. Lebedev, Dmitry Yu Rybnikov, Influence of the width and depth of the channel on the dynamic landing of the vessel, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 64—67.

Введение

В современном мире вопрос безопасного прохождения судов в условиях мелководья приобрел высокую актуальность. Это объясняется тем, что с развитием судостроения, стали строиться суда больших размеров, по сравнению с судами XX века.

С увеличением габаритов морских судов многие районы, которые ранее не были помехой для прохода судов, в настоящий период времени могут считаться мелководными. Помимо увеличения главных размерений вновь строящихся судов, совершенствуются их конструкция и обводы. Большинство новых судов строятся с наличием

носогого бульба. Одним из самых распространенных проектов с носовым бульбом можно назвать серию RSD, которые сейчас активно строятся на российских верфях. Судоводителям, так или иначе, приходится работать в стесненных условиях, таких как: каналы, шлюзы и др. Резолюция ИМО А.893 (21) «Руководство по планированию рейса» [1] и SIRE OCIMF [2] содержат в себе требования по определению минимального запаса воды под днищем при прохождении участков с малыми глубинами. Капитан должен уметь рассчитывать минимальный запас между грунтом и днищем судна для предотвращения посадки судна мель, повреждений о дно, потери управляемости. Такие расчеты выполняются для каждого участка мелководья в отдельности, как правило перед выходом судна в рейс. Одним из наиболее главных факторов для расчета минимального запаса между днищем судна и грунтом является непредсказуемое изменение посадки судна при прохождении стесненных участков как по глубине, так и по ширине.

Просадка зависит от осадки судна, его скорости, глубины судового хода, стесненности фарватера по ширине и начинает сказываться при глубинах [3]:

$$h < 4T_3 + 3 \frac{v^2}{g}$$

где T_3 – средняя осадка судна, м;

v – скорость судна, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Одним из критериев влияния мелководья на просадку является значение числа Фруда, связанное с изменением картины волнообразования:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} - \text{число Фруда.}$$

где H – глубина акватории, м;

v – скорость судна, м/с.

В своих работах Гофман А.Д. [4] обращает внимание, что изменением характера волнообразования на моменты и гидродинамические силы можно пренебречь, если судно движется со скоростью, соответствующей $Fr < 0.6$

Когда число Фруда приближается к единице, наблюдается быстрое увеличение высоты судовой волны, из-за чего в движение судна присоединяется большее количество воды и в следствие массы, вследствие чего возрастает волновое сопротивление, по сравнению с движением с той же скоростью на глубокой воде. Возле бортов наблюдается снижение свободной поверхности, осадка судна увеличивается, что с появлением дифферента на мелководье обусловлено снижением давления под днищем. Данный процесс объясняется тем, что на мелководье увеличивается скорость обтекания днища водой, а вследствие этого и преобразованием судовых волн.

При движении судна в условиях стесненности по ширине, на поле вызванных скоростей влияет не только дно, но и стенки канала, вследствие чего, перепады давления вокруг судна имеют большую амплитуду, нежели в условиях неограниченной акватории. Из-за дополнительного понижения давления происходит дополнительная просадка.

В данный момент есть большое количество работ по изучению и прогнозированию изменения посадки судна в условиях стесненности и мелководности фарватера, которыми занимались как наши соотечественники, так и их зарубежные коллеги. К наиболее актуальным и значимым авторам можно отнести Полунина А.М., Павленко В.Г., Сухомела Г.И., Шанчурова П.Н., Баррасса С.Б. Некоторые методы относятся к морским судам, некоторые к речным, есть так же универсальные методы. Стоит отметить, что работ по определению просадки судна от стесненности фарватера по ширине сравнительно мало, этот вопрос изучен недостаточно. В основном все методы разработаны на основе процессов, происходящих вокруг судна при его движении. Суть его такова: вода характеризуется свойством сплошности, поэтому вытесняемые частицы воды при проседании судна движутся по криволинейной траектории вдоль бортов и днища, в отличие от движения вдоль ДП судна на глубокой воде, за один и то же промежуток времени должны пройти большее расстояние. Из всего этого следует, что скорость частиц, обтекающих судно, будет выше скорости этих же частиц, если бы они двигались по прямой вдоль ДП судна. Ниже представлены наиболее известные методы для определения просадок судов.

1. Материалы и методы

Метод доктора Баррасса С.Б. [5] получил широкое применение. Его одобрили в Балтийском Ллойде, так как подходит для расчета просадки крупных морских судов. С помощью данного метода можно рассчитать величину увеличения осадки для двух типов мелководья: для мелководных путей в открытых водах и для стесненных участков (канал, шлюз). Для мелководных водных путей (открытые воды) предлагается использовать следующее выражение:

$$\Delta T = \delta u^2 10^{-2}$$

где ΔT – величина приращения осадки судна, м;

δ – коэффициент общей полноты судна;

u – скорость судна (в узлах).

Для стесненных условий плавания Баррасс С.Б. предлагает выражение:

$$\Delta T = \delta u^2 50^{-1}$$

В стесненных фарватерах и каналах профиль потока воды сжимается корпусом судна. Отношение поперечного сечения канала к проекции подводной части мидель шпангоута корпуса судна называется коэффициентом загромождения русла канала (B_f).

$$B_f = (bT)(BH)^{-1}$$

где B – ширина судоходного канала, м;

H – глубина судоходного канала, м.

Для речных условий при заданных размерах русла реки, получена формула:

$$\Delta T = K \delta u^2 10^{-2}$$

где $K=(6B_r)+40$

Приведенные формулы достоверны для судов с коэффициентом общей полноты $\delta = 0.5 - 0.9$. Баррасс С.Б. полагает, что суда, с разными коэффициентами общей полноты будут по-разному проседать:

- $\delta = 0.7$ – судно проседает соответственно всем корпусом;
- $\delta > 0.7$ – судно проседает соответственно носом;
- $\delta < 0.7$ – судно проседает соответственно кормой.

Метод Баррасса С.Б. разработан для морских судов и поэтому охватывает отношение осадки судна к глубине фарватера в узких значениях от 0.7 до 0.9. Иными словами, данный метод не дает возможности вычислить скоростную просадку судна в зависимости от запаса воды под днищем судна.

Метод ВГАВТ (ныне – ВГУВТ) [6]

Данный метод уделяет особое внимание особенности формы корпуса судна. Основан он на теории обтекания корпуса судна водой и результатов натурных испытаний. Авторами предложена формула для расчета просадки:

$$\Delta T_{cp} = \bar{\sigma} B Fr^2 \left(\frac{T}{H}\right)^{1/2}$$

где $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_n}{\sigma_k}$ – коэффициент, дающий понятие о форме обводов судна;

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} - \text{число Фруда.}$$

Для расчета речных судов и судов смешанного «река-море» плавания предлагается использовать формулу:

$$\Delta T_{cp} = 1,2\bar{\sigma} B Fr^2 \left(\frac{T}{H}\right)^{1/2}$$

Данный способ имеет хорошую точность, проверенную с данными натурных испытаний, но он рассчитан для судов внутреннего плавания старой постройки и не применим для судов совершенно новых проектов с наличием носового бульба.

2. Решение проблемы

В СГУВТ получена эмпирическая формула:

$$\Delta T = (4.88\delta^2 v^2 - 3.25\delta v^2) \cdot \left(\frac{B \cdot T_0}{b_{cx} \cdot H}\right) + 0.015\delta v^2$$

где ΔT – просадка судна (состава), м;
 δ – коэффициент общей полноты судна (состава)

Для состава коэффициент общей полноты находится по следующей формуле

$$\delta = \frac{\delta_T + \delta_B}{2}$$

где δ_T – коэффициент полноты толкача;
 δ_B – коэффициент полноты несамоходного судна.

B – расчетная ширина судна (состава), м. Для составов берётся наибольшая ширина секции;

T_0 – осадка судна (состава) на глубокой, неограниченной воде, м. Для составов берётся наибольшая осадка секции;

b_{cx} – ширина судового хода, м;

H – глубина судового хода, м;

v – скорость судна (состава), м/с.

На рисунке 1 представлены результаты расчета просадки судна проекта 507Б.

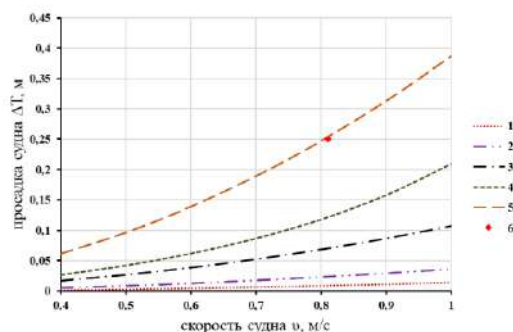


Рис. 1 - Расчетная просадка судна проекта 507Б при варьировании скорости движения, с осадкой 3,1 метр и запасом под днищем 0,4 м; 1 – данные, полученные по методике ВГАВТа, 2 – данные, полученные по методике А.М. Полунина [7], 3 – данные, полученные по методике С.Б. Баррасса, 4 – данные по методике ВСН 3-70 [8], 5 – данные, полученные по методике, предложенной авторами, 6 – экспериментальные данные [9].

Заключение

Большинство из представленных методов не дают точной картины куда именно проседает судно (на нос или на корму). Также становится понятно, что существующие методы не в полной мере учитывают маневр, при котором судно движется в канале очень ограниченных размеров. Натурные испытания показывают, что наличие носового бульба у судов дает сильное влияние на значение динамической просадки. Из всего вышесказанного следует, что вышеперечисленные методы разрабатывались под определенные виды судов и имеют существенные ограничения, так же можно добавить, что существующие методы подходят для расчета просадки судов старой постройки, с традиционными формами корпуса, характерными для того времени.

Метод СГУВТ позволяет вычислить величину динамической просадки при различной глубине, ширине канала и скорости движения, сходимость результатов эксперимента очень хорошая, что позволяет сказать, что данный метод довольно адекватно описывает движение судна на мелководье в условии стесненного фарватера.

Литература

1. Резолюция А.893(21) Руководство по планированию рейса. [Электронный ресурс] принята 25 ноября 1999 года. Режим доступа: [http://www.gfi/chat.ru/imo/A893\(21\).htm](http://www.gfi/chat.ru/imo/A893(21).htm).
2. Анкеты по освидетельствованию судов для нефтеналивных танкеров, комбинированных судов, танкера-челнока, химовозов и газовозов (VIQ 5) 2012. Режим доступа: <http://www.witherbydigital.com/portals/0/pdf/SIRE-VIQ2012Rev2.pdf>.
3. Жуков Е.И. Управление судном и его техническая эксплуатация. М.: Транспорт. 1983. 655с.
4. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания. Л.: "Судостроение". 1971. 256 с.
5. Баррасс С.Б. Конструкция и характеристики судна для капитанов и помощников. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://deckofficer.ru/titul/study/item/ship-design>.
6. Чурин М.Ю. Метод определения динамической просадки судов смешанного «река-море» плавания. Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. URL: www.science-education.ru/111-10228
7. Бавин В.Ф. Ходкость и управляемость судов. М.: Транспорт. 1991. 455 с.
8. Указания по проектированию судоходных каналов. ВСН 3-70. Ленинград.: Транспорт. 1971. 71с.
9. Решетников М.А. Обоснование безопасных глубин для крупнотоннажного судна при его выходе из камеры судоходного шлюза: дис. кандидата технических наук. Нижний Новгород. 2017. 154с.

References

1. IMO resolution A. 893 (21) Rukovodstvo po planirovaniyu reysa [Flight planning guidelines]. [Electronic resource] of 25 November 1999. Access mode: [http://www.gfi/chat.ru/imo/A893\(21\).htm](http://www.gfi/chat.ru/imo/A893(21).htm).
2. Anketyi po osvidetelstvovaniyu sudov dlya neftenalivnyih tankerov, kombinirovannyih sudov, tankera-chelnoka, himovozov i gazovozov (VIQ 5) 2012 [Vessel Inspection Questionnaires for Oil Tankers, Combination Carriers, Shuttle Tankers, Chemical Tankers and Gas Tankers (VIQ 5) 2012]. Access mode: <http://www.witherbydigital.com/portals/0/pdf/SIRE-VIQ2012Rev2.pdf>.
3. Zhukov E. I. Upravlenie sudnom i ego tehnicheskaya ekspluatatsiya [Ship management and its technical operation]. M.: "Transport". 1983. 655p.
4. Gofman A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya [Theory and calculation of the turnability of inland navigation vessels]. L.: "Shipbuilding". 1971. 256 p.
5. Barrass C. B. Konstruktsiya i harakteristiki sudna dlya kapitanov i pomoschnikov [Ship Design and Performance for Masters and Mates]. [Electronic resource]. Access mode: <https://deckofficer.ru/titul/study/item/ship-design>
6. Churin M. Yu. Metod opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov smeshannogo «reka-more» plavaniya [Method for determining the dynamic drawdown of vessels of mixed "river-sea" navigation]. Modern problems of Science and education. 2013. №3. URL: www.science-education.ru/111-10228.
7. Bavin V. F. Hodkost i upravlyaemost sudov [Seaworthiness and controllability of vessels]. M.: Transport, 1991. 455 p.
8. Ukazaniya po proektirovaniyu sudohodnyih kanalov. VSN 3-70 [Guidelines for the design of shipping channels. VSN 3-70]. Leningrad: Transport. 1971. 71p.
9. Reshetnikov M. A. Obosnovanie bezopasnyih glubin dlya krupnotonnajogo sudna pri ego vyihode iz kameryi sudohodnogo shlyuza [Substantiation of safe depths for a large-tonnage vessel at its exit from the chamber of a navigable lock]: dis. kandidata tehnikeskikh nauk. Nizhny Novgorod. 2017. 154p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Викторович Филь, кандидат технических наук, доцент, Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова, 344006, г. Ростов-на-Дону, улица Седова, 8, e-mail: fil@iwtsedov.ru.

Alexander V. Fil, Ph.D. (Eng), Assistant professor, Institute of Water Transport named after G.Ya. Sedova, Sedova, 8, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: fil@iwtsedov.ru.

Олег Юрьевич Лебедев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: oleg@yandex.ru.

Oleg Yu. Lebedev, Ph.D. (Eng), Assistant professor, Assistant professor of the Department of ship theory, shipbuilding and materials technology, Siberian State University of Water Transport, Shchetinkina, 33, Novosibirsk, 630099, Russian Federation, e-mail: oleg@yandex.ru.

Дмитрий Юрьевич Рыбников, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: dmitry2012@yandex.ru.

Dmitry Yu Rybnikov, graduate student, Siberian State University of Water Transport, Shchetinkina, 33, Novosibirsk, 630099, Russian Federation, e-mail: dmitry2012@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.11.2021.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.09.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 10.11.2022.

Научная статья

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.025>

Комплекс программно-аппаратных средств для решения задач автономного судовождения

А.В. Гринек¹ e-mail: grinyokann@gmail.com, И.П. Бойчук¹ e-mail: boychuk@ieee.org,
Я.В. Бурюлин¹ e-mail: y.burylin@gmail.com, А.Л. Боран-Кешишьян¹ e-mail: bkanastas@gmail.com,
С.И. Кондратьев¹ e-mail: mail@nsma.ru

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

Аннотация. В статье представлен опыт решения комплекса задач, связанных с проектированием и изготовлением малого автономного судна на базе научно-исследовательского центра безэкипажного судовождения Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова. Рассмотрены существующие разработки и пути развития малого автономного вспомогательного флота в области е-навигации, инновационного судостроения и цифрового образования. В изготовленном экспериментальном автономном судне отработаны алгоритмы движения, реализованные в автоматизированной системе управления. Успешно апробирован оригинальный способ управления с помощью автопилота. В качестве средств берегового мобильного модуля управления и мониторинга разработан комплекс программно-аппаратных решений для построенного прототипа судна, реализующий оригинальные алгоритмы определения и корректировки курса. Получены решения задач в области автономной навигации, судостроения. Результаты показывают хорошие ресурсы и возможности данного судна для дальнейшего использования в прибрежных обследованиях, картографических исследованиях, технологиях навигации, проводки и алгоритмов расхождения подобных судов.

Ключевые слова: автономное судно, е-навигация, судостроение, картографическая система, система управления

Для цитирования: Бурюлин Я.В., Гринек А.В., Бойчук И.П., Боран-Кешишьян А.Л., Кондратьев С.И. Комплекс программно-аппаратных средств для решения задач автономного судовождения Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 68—74.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.025>

Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation

Anna V. Grinek¹ e-mail: grinyokann@gmail.com, Igor P. Boychuk¹ e-mail: boychuk@ieee.org,
Yaroslav V. Burylin¹ e-mail: y.burylin@gmail.com, Anastas L. Boran-Keshishyan¹ e-mail: bkanastas@gmail.com,
Sergey I. Kondratyev¹ e-mail: mail@nsma.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Russian Federation

Аннотация. The article presents the experience of solving a set of problems of designing and manufacturing a small autonomous vessel at the scientific research center of skip navigation of the Admiral Ushakov Maritime State University. The work presents existing developments and ways to develop a small autonomous auxiliary fleet in the field of e-navigation, innovative shipbuilding and digital education. In an experimental autonomous vessel, motion algorithms implemented in an automated control system have been worked out. Successfully tested the original method of control with the help of autopilot. As a means of the onshore mobile control and monitoring module, a set of software and hardware solutions for the built prototype of the ship was developed, implementing original algorithms for determining and adjusting the course. Solutions to problems in the field of autonomous navigation and shipbuilding have been obtained. The results show the good resources and capabilities of this vessel for further use in coastal surveys, mapping studies, navigation technologies, and wiring and divergence algorithms of such vessels.

Key words: autonomous ship, e-navigation, drone, shipbuilding, mapping system, control system

For citation: Yaroslav V. Burylin, Anna V. Grinek, Igor P. Boychuk, Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey I. Kondratyev Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 68—74.

Введение

Развитие автономного морского транспортного флота является одной из главных стратегических задач зарубежной и отечественной транспортных отраслей [1]. Для этого требуются решения в области задач навигации, инновационного судостроения и образовательной среды, нуждающейся в новых образовательных стандартах и технологиях [2]. Современные тенденции в автономном

судовождении объединяют в себя направления и связанные с ними промышленные и образовательные задачи, представленные на рис.1.

В области е-навигации должны быть решены следующие задачи:

- развертывание мобильной навигационной сети;
- создание картографической системы для операторов автономного судна;
- разработка новых правил и алгоритмов расхождения нескольких автономных судов.

Направления в сфере инновационного судостроения:

- прототипирование новых конструкций;
- внедрение аддитивных технологий в судостроение.

Цифровизация отраслевого образования:

- разработка виртуальных учебных комплексов;
- создание цифровых двойников автономных судов и непрерывного учебного цикла.

В области подготовки кадров для автономного флота требуется разработка новых образовательных стандартов и подходов: операторов связи, разработчиков высокого класса и прочих специалистов.

В результате организации автономного портового хозяйства могут быть достигнуты следующие результаты:

1. Согласование работы судов различной степени автономности путем создания единой информационной платформы.
2. Организация работы береговых операторских центров управления безэкипажным судовождением и защищенного широкополосного информационного радиоканала «судно-оператор» и «судно-судно».
3. Повышение мощности портовой инфраструктуры путем внедрения автономных судов в процессы обеспечения портовых операций.
4. Тренажерная база и рабочие программы подготовки для обучающихся специалистов отрасли безэкипажной навигации.
5. Логистическое звено «судно - морской порт» в качестве деловой экосистемы и использование «сквозных технологий» цифровизации, позволяющих перейти к режиму «единого окна», с точки зрения информационного обеспечения.

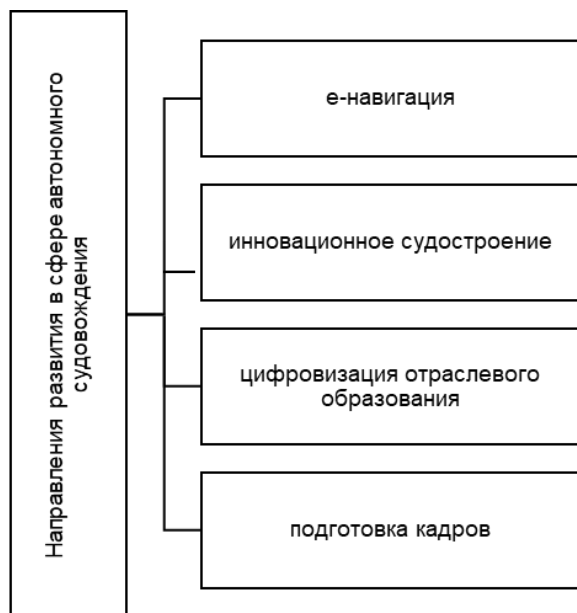


Рис. 1. Направления развития в сфере автономного судовождения

1. Малое автономное судно

На сегодняшний момент существует значительное число уже построенных и используемых автономных судов различного назначения: контейнеровозы - электроходы, паромы, шельфовые суда, суда для эхографических

обследований портов, автономные патрульные суда [3-6]. Отечественные и зарубежные малые автономные суда соответствуют международной классификации степени автономности как дистанционно управляемому судну без экипажа. Идет постоянное непрерывное развитие автономного судовождения, малого в том числе, совершенствуются алгоритмы принятия решений и управления, а также вырабатываются новые конструктивные решения [7,8].

В Государственном морском университете имени адмирала Ф.Ф. Ушакова ведется работа над проектированием и постройкой прототипов малых автономных судов. На основании проведенных работ научно - исследовательского центра безэкипажного судовождения университета разработано и изготовлено «Малое автономное судно 1.0.» (рис.2), в котором реализованы оригинальные передовые разработки университета. Постройка судна потребовала решения задач в области создания математических моделей для идентификации и описания движения судна, разработки систем навигации и визуализации для оператора, а также программно-аппаратных решений для обеспечения электроснабжения судна.

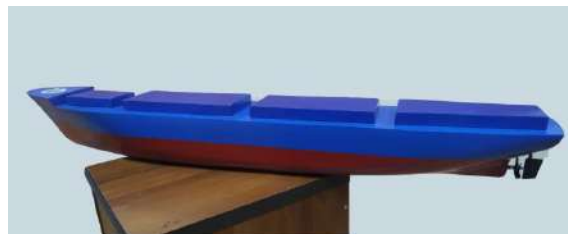


Рис. 2. Малое автономное судно 1.0.

В экспериментальном малом автономном судне отработаны алгоритмы движения, реализованные в автоматизированной системе управления.

Успешно апробирован алгоритм управления авторулевого на основе оригинального способа управления движением [9].

Проведенные эксперименты и испытания судна в автоматическом и ручном режимах в экспериментальном и природном бассейнах (рис. 3) показали эффективность технических решений.



а)



б)



в)

Рис. 3. Испытания базового прототипа в автоматическом и ручном режимах: а – в бухте Черного моря; б – в береговом учебно-тренажерном центре ГМУ; в – в образовательном центре «Сириус»

Данная тематика активно развивается в проектных сменах образовательного центра «Сириус», а также в научной студенческой работе ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова [10,11].

2. Разработка интерфейса системы управления

Для автономного плавания судна разработан оригинальный картографический интерфейс для выполнения навигационных задач в черноморском бассейне [11].

Оператор автономного судна видит на экране электронной картографической навигационно-информационной системы отображаемую заданную траекторию движения, вектор движения, направление на следующую точку траектории поверх интерактивной карты спутникового обзора.

Интерфейс представляет собой упрощенный аналог морской электронной картографической навигационной информационной системы.

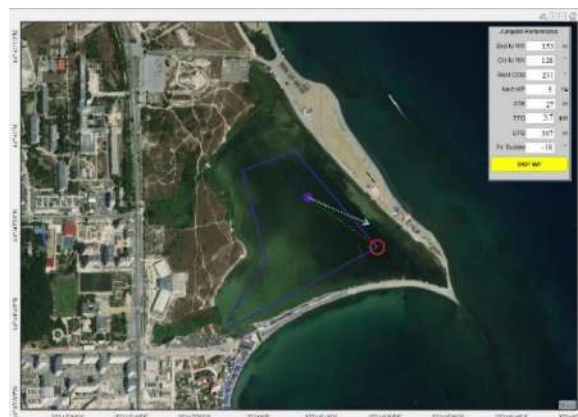
На рис. 4,а показан пример отображения заданной и выполняемой траектории при прохождении маршрута. Интерфейс позволяет оператору наблюдать заданную и исполняемую траекторию.

Кроме того, система позволяет отслеживать дистанцию до следующей путевой точки, путевой

угол до следующей путевой точки, следующий путевой угол траектории, следующую путевую точку, текущее отклонение от траектории.

В системе управления осуществляется расчет времени и дистанции до конца траектории, заданное авторулевым положение пера руля, предыдущие положения судна.

Разработанный алгоритм позволяет переключаться между последующими путевыми точками заданной траектории (рис. 4, б).



а)

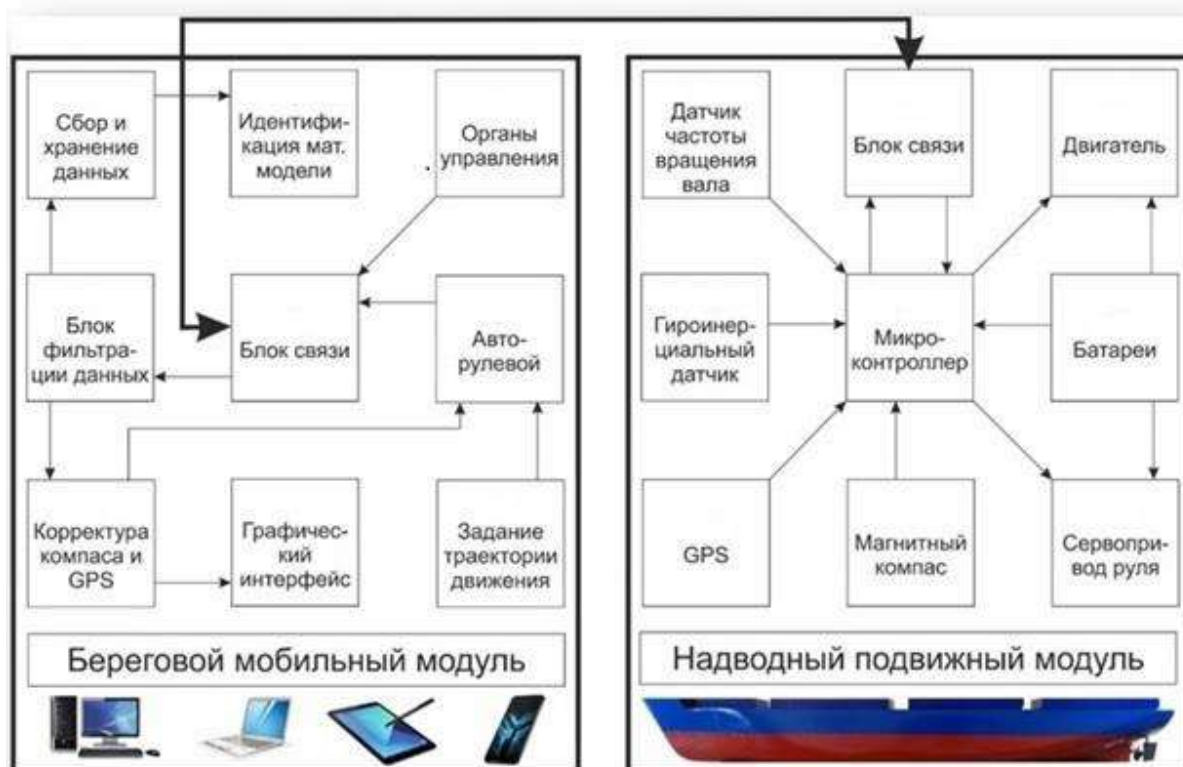


б)

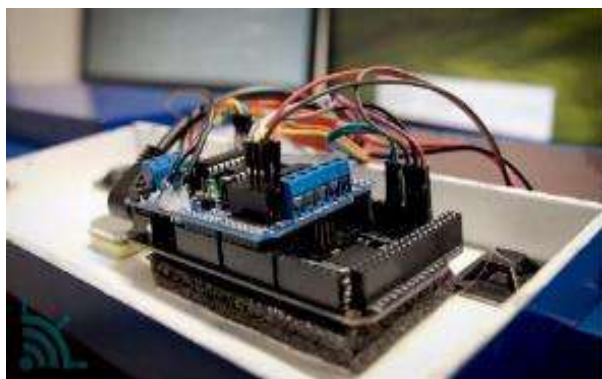
Рис. 4: Реализация алгоритма автоматического движения судна по траектории: а – пример отображения заданной и выполняемой траекторий при прохождении маршрута (Суджукская коса г. Новороссийск); б – пример отображения заданной и выполняемой траекторий при прохождении маршрута (пруд «Сириуса» с. Сочи)

3. Автоматизированная система движения для малогабаритного аналога

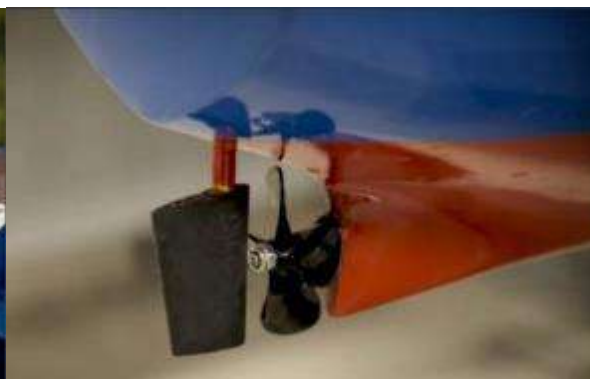
В результате выполнения проекта «Малое автономное судно 1.0» разработана автоматизированная система движения для малогабаритного аналога. Судно способно выполнять маневрирование по заданной географическими координатами траектории на основании данных, поступающих от установленных на борту гироскопических, инерциальных, геопозиционных, магнитных датчиков. Судно может управляться дистанционно с берегового мобильного модуля (рис. 5).



а)



б)



в)

Рис. 5: Схема и составные части системы управления: а – структура программно-аппаратного комплекса; б – контроллер системы управления приводом движения; в – гребной винт и руль

4. Комплекс программно-аппаратных решений

В качестве средств берегового мобильного модуля (рис. 6) разработан комплекс программно-аппаратных решений для построенного прототипа судна, реализующий оригинальные алгоритмы определения и корректирования курса. Разработанный интерфейс оператора автономного судна позволяет:

- получать навигационную и кинематическую информацию по судну в графическом и числовом виде;
- воздействовать на средства управления одно- или двухвинтового судна по каналу беспроводной защищенной связи;
- калибровать судовые датчики и адаптировать параметры автоматической системы управления в on-line режиме;
- задавать траекторию движения судна в географических координатах.

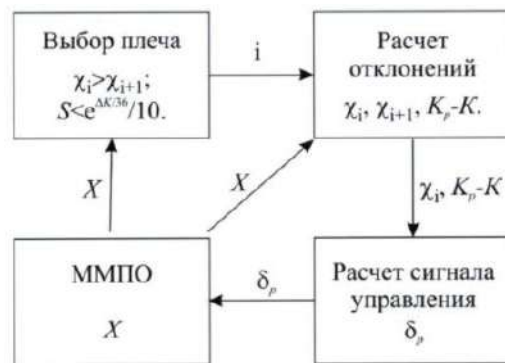
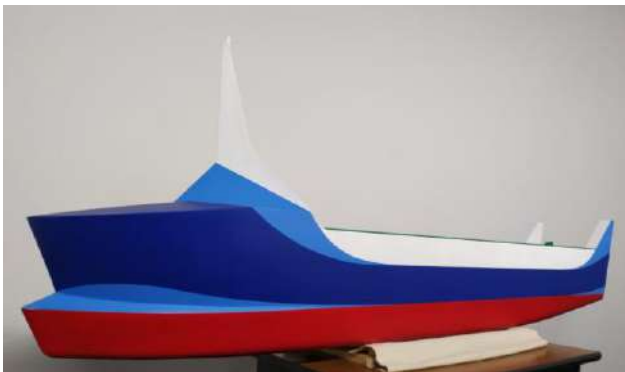


а) б)
 Рис. 6. Береговой мобильный модуль: а – оператор на берегу на берегу; в –общий вид интерфейса пользователя картографической системы

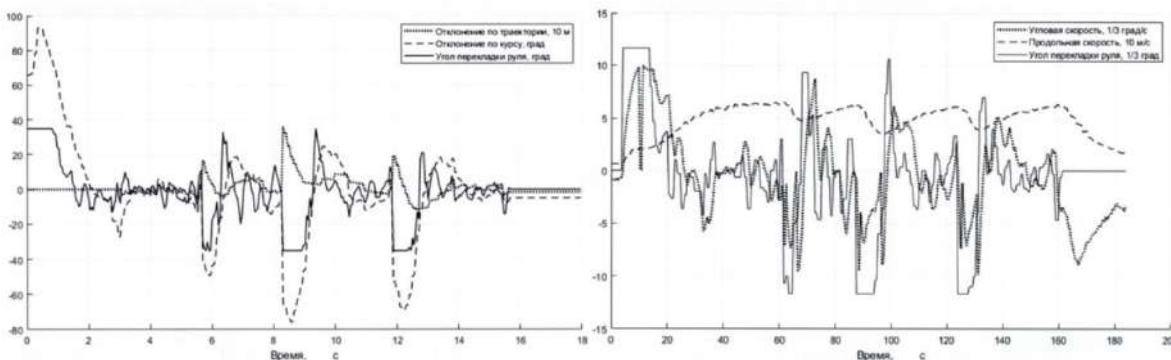
В данный момент в центре развития безэкипажного судовождения ГМУ имени адмирала Ушакова ведется работа по изготовлению «Малого автономного судна 2.0» (рис. 7) с системой динамического позиционирования. Второй опытный образец способен совершать автоматическое движение и швартовку с использованием системы электродвижения и системы сбора данных с датчиков о текущем состоянии.

Получены решения, позволяющие повысить точность автоматического управляющего

воздействия проводки маломерного автономного судна [12]. Производится расчет авторулевым, представленным иерархически организованными регулятором по курсу и регулятором по траектории, при этом используются статистические или стохастические модели движения судна. Установлена математическая зависимость расстояния от положения судна до следующего плеча траектории, на котором необходимо начинать маневр, от угла поворота и текущих кинематических характеристик судна (рис. 8).



а) б)
 Рис. 7. Модернизированное малое автономное судно 2.0: а – общий вид; б –схема способа проводки



а) б)
 Рис. 8. Управляющее воздействие и кинематические параметры: а – отклонения по траектории; б – отклонения по скорости движения

Рис. 8 (а,б) демонстрирует, что предложенное решение по управлению траекторией автономного судна представляется удовлетворительным, несмотря на заданные существенные углы поворота.

Следует заметить, что необходимы дальнейшие эксперименты для настройки коэффициентов регулятора, адаптации, фильтрации скользящим

средним в зависимости от характера движения, уточнения математической модели судна.

Результаты

В ходе выполнения проекта были получены следующие научно-исследовательские и опытно-конструкторские результаты:

- разработана система управления судном с береговым обеспечением дистанционного управления;

- разработана система мониторинга, включающая комплекс средств измерения, передачи, обработки и визуализации кинематических, динамических и навигационных данных;

- разработана система автоматического управления движением судна;

- получены математические модели функционирования, идентификации, визуализации и прогнозирования, используемые, в частности, в учебных тренажерах;

Полученные проектировочные решения успешно апробированы в натурных условиях.

Результаты показывают достаточные ресурсы и возможности данного судна для дальнейшего использования в прибрежных обследованиях, картографических исследованиях, технологиях навигации, проводки и алгоритмов расхождения подобных судов.

Заключение

Дальнейшие исследования предполагают возможность создания тренажерного центра с управляемыми моделями судов в ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» для отработки навыков и приобретения соответствующих компетенций операторов безэкипажных (автономных) морских судов.

На основе представленных решений возможно развитие сопряжения отечественных производителей с судостроительными предприятиями в будущем, оформление сегмента рынка, а также, развитие технологических решений для узкого сегмента рынка специализированной техники - перспективная ниша отечественного безэкипажного судовождения.

Литература

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Пинский А. С. E-Навигация и безэкипажное судовождение. Транспорт РФ. 2016. № 4 (65). С. 50–54.
3. D. F. Carlson, A. Fürsterling, L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. HardwareX, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.
5. B. Bayat, N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. Current Opinion in Biotechnology, 2017. № 45. – P. 76–84.
6. Matthew Dunbabin, Alistair Grinham, James Udy. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. Annual of navigation. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Патент №2021612609 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04 (2006.01), G05В 13/04 (2006.01), G08G 3/00 (2006.01). Способ автоматической проводки судна: № 2021611569: заявл. 09.02.2021: опубл.19.02.2021/ Бурылин Я.В., Кондратьев А.С., Попов А.Н.; заявитель ГМУ. – 4 с.
10. Гринек А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Перельгин Д.Н., Савостеенко Н.В. Конечно-элементное моделирование судового генератора. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-4 (50). С. 92-97.
11. Y. Burylin. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Y. Burylin. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. P. 1–7.

References

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Pinskiy A. S. E-Navigatsiya i bezekipazhnoe sudovozhdenie [E-Navigation and unmanned navigation]. Transport RF. 2016, №4 (65), S. 93-100.
3. D. F. Carlson, A. Fürsterling, L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. HardwareX, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.
5. B. Bayat, N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. Current Opinion in Biotechnology, 2017. № 45. - P. 76–84.

6. Matthew Dunbabin, Alistair Grinham, James Udy. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. Annual of navigation. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Sposob avtomaticheskoy provodki sudna [Automatic pilotage method]: pat. 2021612609 Ros. Federacziya, Burylin YA.V., Kondrat'ev A.S., Popov A.N.; zayavitel' ipatentoobladatel' FGBOU VO «GMU imeni admiral F.F.Ushakova» no. 2021612609: declared. 09.02.2021: published.: 19.02.2021.
10. Grinek A.V., Fishchenko A.M., Boychuk I.P., Perelygin D.N., Savosteenko N.V. Finite element simulation of marine generators. Marine intelligent technologies. 2020, № 4-4 (50). S. 92–97.
11. Y. Burylin. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Y. Burylin. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021).Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. P. 1–7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анна Владимировна Гринек, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: grinyokann@gmail.com

Anna V. Grinek, Ph.D., associate professor, Department of Ship's electric and automatic devices, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: grinyokann@gmail.com

Игорь Петрович Бойчук, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры высшей математики и физики, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: boychuk@ieee.org

Igor P. Boychuk, Ph.D., head of Department of Higher Mathematics and Physics, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: boychuk@ieee.org

Ярослав Васильевич Бурьлин, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: y.burylin@gmail.com

Yaroslav V. Burylin, Ph.D, associate professor, Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: y.burylin@gmail.com

Анастас Леонидович Боран-Кешишьян, кандидат технических наук, доцент, проректор по конвенционной подготовке и филиалам, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: bkanastas@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D., Vice-Rector for Conventional Training and Developments, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: bkanastas@gmail.com

Сергей Иванович Кондратьев, доктор технических наук, профессор, ректор, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: mail@nsma.ru

Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci., professor, rector, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: mail@nsma.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.026>

Исследование прочности на сжатие элементов корпуса судна, полученных методом 3D-печати

П.Д. Полухин¹ e-mail: 99ppd99@gmail.com, А.Р. Рубан¹ e-mail: a.ruban1974@mail.ruГ.А. Кушнер¹ e-mail: guriy.kushner@mail.ru, Д.А. Волков¹ e-mail: volkovdima95@mail.ru¹Астраханский государственный технический университет

Аннотация В работе приводятся результаты исследования прочности на сжатие элементов корпуса судна, полученных методом 3D-печати. Для определения прочности на сжатие были изготовлены цилиндрические образцы из двух видов пластика, ABS и PETG, с различной степенью заполнения. Для проведения испытаний использовалась стандартная методика для измерения прочности на сжатие образцов из полимерного пластика. Установлено, что для образцов при увеличении заполнения с 20% до 100% из ABS пластика удельная прочность увеличилась на 366% а из PETG пластика удельная прочность увеличилась на 79%. Таким образом, для печати с малым заполнением целесообразнее использовать ABS пластик. Сжатие образцов сопровождалось изменением их формы – появлялась бочкообразность. При этом было отмечено, что на определенном этапе появлялись трещины. При помощи металлографического микроскопа с системой визуализации установлено, что в 90% случаев деформация более 10% сопровождается образованием трещин в зоне спекания слоев. При этом, коэффициент заполнения образцов не является определяющим.

Ключевые слова: судостроение, аддитивные технологии, элементы корпуса судна, прочность на сжатие, 3D-печать.

Для цитирования: Полухин П.Д., Рубан А.Р., Кушнер Г.А., Волков Д.А. Исследование прочности на сжатие элементов корпуса судна, полученных методом 3D-печати, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 75—81.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.026>

Investigation of the compressive strength of ship hull elements obtained by 3D printing

Pavel D. Polukhin¹ e-mail: 99ppd99@gmail.com, Anatoliy R. Ruban¹ e-mail: a.ruban1974@mail.ru,Guriy A. Kushner¹ e-mail: guriy.kushner@mail.ru, Dmitri A. Volkov¹ e-mail: volkovdima95@mail.ru¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a study of the compressive strength of the elements of the ship's hull, obtained by the method of 3D printing. To determine the compressive strength, cylindrical specimens were made from two types of plastics, ABS and PETG, with different degrees of filling. The tests were carried out using a standard procedure for measuring the compressive strength of polymer plastic specimens. It was found that for specimens with an increase in filling from 20% to 100% from ABS plastic, the specific strength increased by 366%, and from PETG plastic, the specific strength increased by 79%. Thus, it is more expedient to use ABS plastic for printing with low infill. The compression of the samples was accompanied by a change in their shape - a barrel-shaped appearance appeared. At the same time, it was noted that cracks appeared at a certain stage. Using a metallographic microscope with a visualization system, it was found that in 90% of cases, deformation of more than 10% is accompanied by the formation of cracks in the sintering zone of the layers. In this case, the filling factor of the samples is not decisive in this case.

Key words: shipbuilding, additive technologies, ship hull elements, compressive strength, 3D printing.

For citation: Pavel D. Polukhin, Anatoliy R. Ruban, Guriy A. Kushner, Dmitri A. Volkov Investigation of the compressive strength of ship hull elements obtained by 3D printing, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 75—81.

Введение

В настоящее время всё масштабнее идёт освоение технологии 3D-печати применительно к различным областям промышленности. Этот процесс затрагивает, в том числе, и такую консервативную отрасль как судостроение. Ряд крупных компаний, таких как Wartsila, Ivaldi Group Inc., Wilhelmsen, и др. уже используют аддитивные технологии при производстве или ремонте судов. В связи с этим активно изучается применимость используемых в аддитивной технологии материалов, как классических металлов, так и новых полимерных пластиков, для создания различных элементов судна

[1]. Но для создания полной картины применимости материала должны производиться фактические серийные испытания физических свойств образцов предполагаемого изделия. В данной статье рассматривается возможная технология исследования прочности на сжатие элементов корпуса судна, полученных методом 3D-печати.

Исследование прочностных характеристик печатных изделий проводится с 2015 года. Нами был проведен эксперимент по изучению влияния заполнения изделия на его прочность при сжатии. Коэффициент заполнения можно назвать краеугольным камнем технологии, который определяет скорость печати изделия и его

стоимость, однако его влияние на прочность и долговечность конструкции всё еще недостаточно изучено.

1. Обоснование необходимости проведения НИР

В последние десятилетия с каждым годом увеличивается доля пластика в производстве как предметов обихода, так и специализированных приборов и механизмов. Вместе с новыми материалами пришли и новые технологии изготовления – так называемые «аддитивные технологии», смысл которых заключается в послойном наращивании и синтезе объектов. Наибольшее распространение за счёт высокой степени автоматизации и широкому спектру возможностей в наше время получила технология 3D-печати. Это, в свою очередь, привело к развитию материалов, наиболее удобных для нового вида производства – полимерных пластиков, о которых далее пойдёт речь.

Согласно правилам классификации и постройки морских судов, части 16 [2], которые ссылаются на ГОСТы, американские и французские стандарты, европейские нормы и рекомендации ассоциации поставщиков современных композитных материалов, к основным требованиям к пластику, используемому в судостроении, относятся: плотность; относительное содержание связующего; модуль нормальной упругости; коэффициент Пуассона и предельное относительное удлинение; максимальное напряжение при растяжении, сжатии, изгибе, межслойном сдвиге; предел ограниченной выносливости при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге; предел долговременной прочности и т.д. Поэтому, в связи с тем, что практически отсутствуют точные сведения о прочностных характеристиках многих пластиков, чтобы выбрать оптимальный материал и определить необходимую технологию изготовления деталей машин из пластика, необходимо провести экспериментальные исследования для оценки характеристик пластиков на большом числе образцов, что и является предметом нашего исследования.

2. Оборудование и материалы для исследования

Согласно правилам классификации и постройки морских судов, части 16 [2], к основным требованиям к пластику, используемому в судостроении, относят в том числе и максимальное напряжение при сжатии, которое нормируется рядом международных стандартов, таких как ASTM D 638 [3], ISO 527 [4], SACMA RM 1 [5]. Для определения прочности на сжатие были изготовлены цилиндрические образцы из двух видов пластика, ABS и PETG, с различной степенью заполнения. Химическая формула PETG — $C_{10}H_8O_4$. Химическая формула ABS — $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$. Форма образцов выбиралась согласно ГОСТ 4651-2014 (ISO 604). Для исследования выбраны два вида пластика ABS и PETG, как наиболее распространенные. Образцы распечатывались на 3D-принтере ATMAT Galaxy 600 (рис. 1). Ниже представлено его описание и основные параметры печати.

3D-принтер ATMAT Galaxy 600 предназначен для печати методом наплавления полимерной нити (FFF) с диаметром 1,75 мм. Принтер установлен на

жесткую опорную раму, оснащён линейными направляющими и двойным экструдером, который позволяет выполнять двухцветную печать или использовать два материала для неотрывной печати образцов с поддержкой. Рабочая платформа выполнена из гранита, снабжена подогревом. Принтер снабжён устройством автокалибровки.



Рис. 1. Образцы испытаний на сжатие

Основные параметры печати:

1. Филамент: PETG, ABS;
2. Температура печати: 235° С;
3. Толщина слоя: 0,3 мм;
4. Толщина одной стенки оболочки: 0.8 мм;
5. Количество стенок в оболочке: 2;
6. Экструзия (flow): 100%.

Образцы печатались при следующих условиях:

Для пластика ABS: температура печати: 250 °С; температура подогрева платформы: 110 °С; время печати: 10 минут.

Для пластика PETG: 240 °С; температура подогрева платформы: 95 °С; время печати: 15 минут.

На прочность детали при сжатии влияет множество параметров печати. Было решено начать исследование с изменения параметров заполнения и построения графиков «% заполнения – прочность». Это поможет найти идеальное соотношение «цена – качество».

В качестве шаблона для заполнения образцов был выбран зигзаг. Этот шаблон заполнения характеризуется высокой скоростью печати, в то же время он обеспечивает, сравнимую с другими шаблонами, прочность при сжимающем усилии вдоль высоты напечатанной детали.

Для испытания были напечатаны 5 групп образцов с процентами заполнения детали 20%, 40%, 60%, 80% и 100%. С увеличением заполнения детали увеличивается площадь сечения, что повышает прочность. Большее заполнение также позволяет повысить жесткость детали. Поскольку выдавливаемая полимерная нить обладает определенной толщиной при печати заполнения, то после печати детали мы получаем реальный процент заполнения детали, который будет отличаться от теоретического – заданного при моделировании. Поэтому все образцы перед испытаниями были взвешены и среднее значение массы образца в каждой группе составило 9,64; 13,34; 17,40; 21,26 и 25,04 грамма соответственно.

Испытания на сжатие проводилось на базе Центра по испытаниям, внедрению, сертификации продукции, стандартизации и метрологии. Для проведения испытаний использовалась методика, описанная в ГОСТ 4651-2014 [1], согласно которому образец помещают между опорными площадками сжимающего устройства, после чего образцы нагружают с определённой скоростью, контролируя нагрузку и деформацию образца (рис. 2).

Для проведения испытаний использовалось следующее оборудование: Машина ДТС-06-50/50 для испытаний а/б материалов (рис. 3). Создаваемая нагрузка от 0,001 кН до 50 кН. Погрешность измерения составляет: при нагрузке от 2 до 50 кН – $\pm 1\%$; при нагрузке менее 2 кН – ± 20 Н.

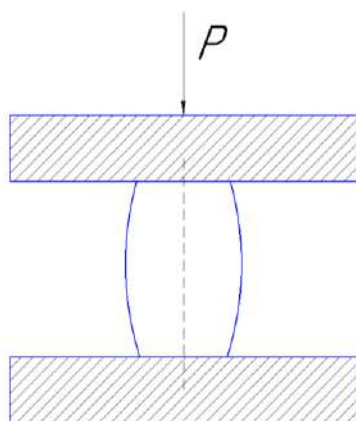


Рис. 2. Схема нагружения образца



Рис. 3. Сжимающее устройство

Для контроля структуры образцов использовался металлографический микроскоп ЛабоМет И-2 с

увеличением от 40 до 400 раз, с системой визуализации. Использованная камера: DCM510 5M pixels, CMOS chip.

3. Результаты эксперимента

Согласно протоколу испытаний № 1/14/05/53 от 14 мая 2021 г. были получены данные, приведённые в таблицах 1 и 2.

Установлено, что для образцов при увеличении заполнения с 20% до 100% из ABS пластика удельная прочность увеличилась на 370% а из PETG пластика удельная прочность увеличилась на 80%. Таким образом, для печати с малым заполнением целесообразнее использовать ABS пластик.

Сжатие образцов сопровождалось изменением их формы – появлялась бочкообразность. При этом было отмечено, что на определенном этапе появлялись трещины. При помощи металлографического микроскопа с системой визуализации установлено, что в 90% случаев деформация более 10% сопровождается образованием трещин в зоне спекания слоев (рис. 4-7). Коэффициент заполнения образцов при этом не является определяющим.

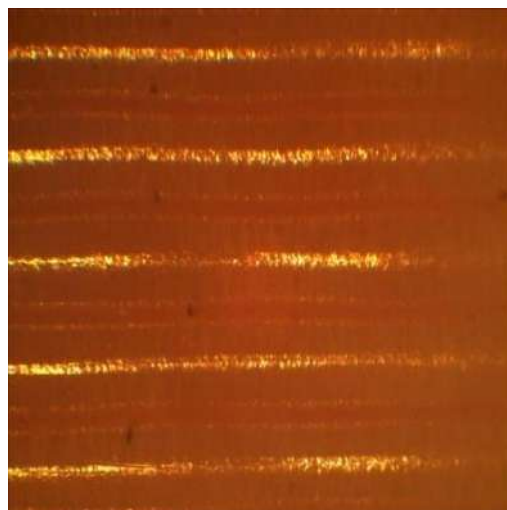


Рис. 4. Образец без деформации x200

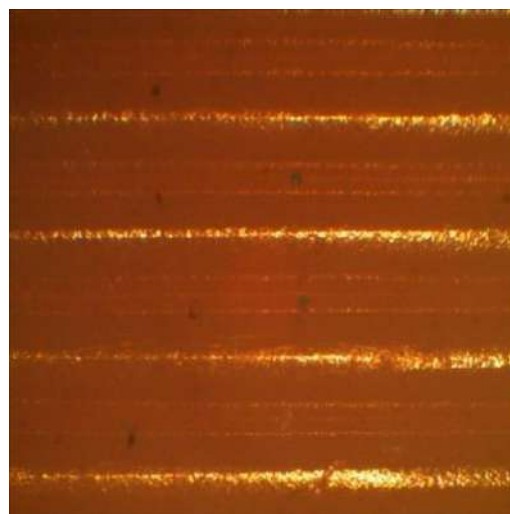


Рис. 5. Линейная деформация 5% x200

Таблица 1

ABS пластик

N/N	Заполнение, %	Масса, г	Плотность, кг/м ³	Максимальная нагрузка, Н	Предел прочности, МПа	Удельная прочность на сжатие, м ² /с ²
1.	20	9,64	389,8	4917	7,16	0,018
2.	40	13,34	536,3	7523	15,09	0,028
3.	60	17,40	699,5	14744	29,58	0,042
4.	80	21,26	705,1	19579	39,59	0,056
5.	100	25,04	719,5	29928	60,51	0,084

Таблица 2

PETG пластик

N/N	Заполнение, %	Масса, г	Плотность, кг/м ³	Максимальная нагрузка, Н	Предел прочности, МПа	Удельная прочность на сжатие, м ² /с ²
1.	20	10,98	438,8	4092	8,21	0,019
2.	40	15,78	628,1	7061	14,05	0,022
3.	60	20,44	820,0	9464	19,04	0,023
4.	80	25,15	1045,7	15972	32,55	0,031
5.	100	30,26	1226,3	21316	42,76	0,034

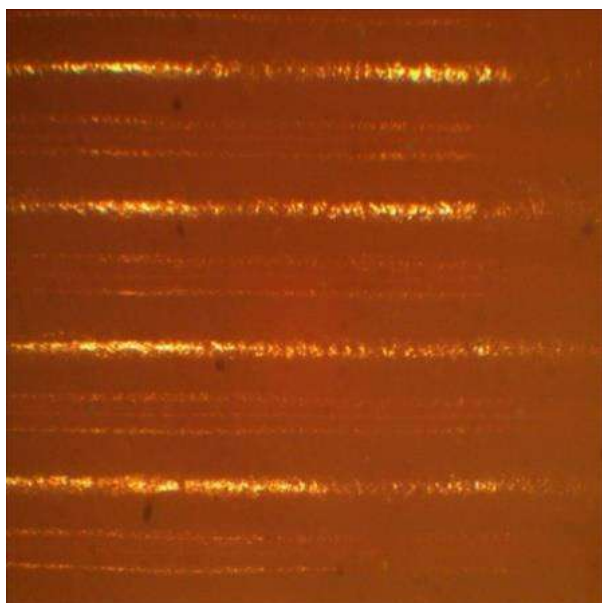


Рис. 6. Линейная деформация 7% x200

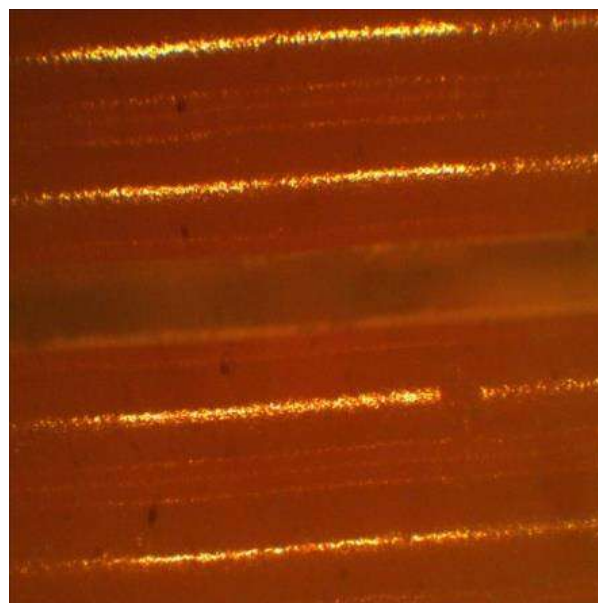


Рис. 7. Образование трещины в зоне спекания слоёв x200

Для определения прочности на сжатие были изготовлены цилиндрические образцы из двух видов пластиков, ABS и PETG, с различной степенью заполнения. Для проведения испытаний использовалась стандартная методика для измерения прочности на сжатие образцов из полимерного пластика. Установлено, что для образцов при увеличении заполнения с 20% до 100% из ABS пластика удельная прочность увеличилась на 370% а из PETG пластика удельная прочность увеличилась на 80% (рис. 8). Таким образом, для

печати с малым заполнением целесообразнее использовать ABS пластик. Сжатие образцов сопровождалось изменением их формы – появлялась бочкообразность. При этом было отмечено, что на определенном этапе появлялись трещины. При помощи металлографического микроскопа с системой визуализации установлено, что в 90% случаев при деформации от 10% и более сопровождалось образованием трещин. Коэффициент заполнения образцов при этом не является определяющим.

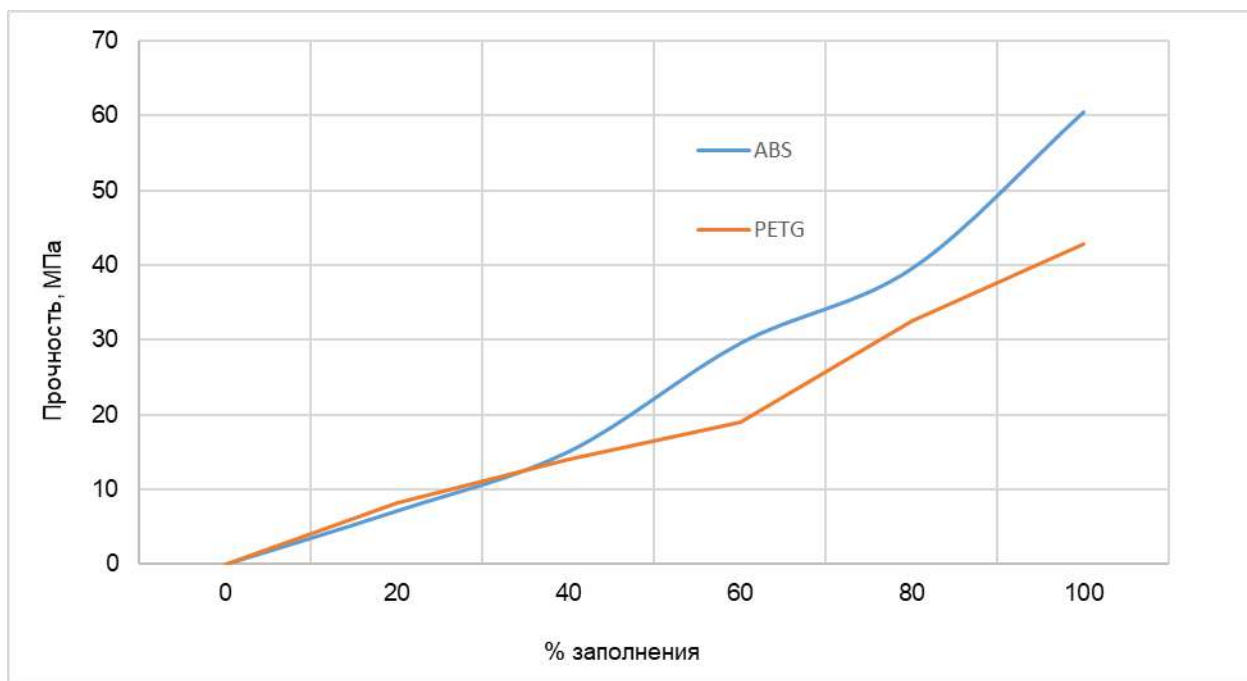


Рис. 8. Зависимость прочности образца от % заполнения

Заключение

В результате проведённых исследований установлено:

1. Для образцов, при увеличении заполнения увеличении заполнения с 20% до 100% из ABS пластика удельная прочность увеличилась на 370% а из PETG пластика удельная прочность увеличилась на 80%.
2. Коэффициент заполнения при этом не является определяющим, в связи с тем, что в 90% случаев

деформация более 10% сопровождается образованием трещин в зоне спекания слоев.

Предложенная в работе технология исследования прочности на сжатие элементов, полученных методом 3D-печати, может быть применима для изучения свойств корпусов соответствующих судов, а также адаптирована для проведения других исследований механических деформаций.

Литература

1. Онлайн справочник пластиков и полимеров. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e-plastic.ru/spravochnik/materiali/> (дата обращения: 03.10.21)
2. Правила классификации и постройки морских судов, часть XVI. Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов. Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб, 2021. – 173 с.
3. ГОСТ 4651-2014 – «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» / Стандартиформ. Дата введения 01.03.2015.
4. ГОСТ Р 58597-2019 – «Аддитивные технологии. Меры неразрушающего контроля, изготовленные методами аддитивных технологий» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 989-ст от 15.10.2019.
5. ГОСТ Р 58598-2019 – «Аддитивные технологии. Виды и методы неразрушающего контроля изделий» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 990-ст от 15.10.2019.
6. ГОСТ Р 58600-2019 – «Аддитивные технологии. Неразрушающий контроль металлических изделий, изготовленных методами аддитивных технологий. Основные положения» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 994-ст от 15.10.2019.
7. ГОСТ Р 59095-2020 – «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 789-ст от 09.10.2020.
8. ГОСТ Р 59096-2020 – «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 790-ст от 09.10.2020.
9. ГОСТ Р 59097-2020 – «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 791-ст от 09.10.2020.
10. ГОСТ Р 59130-2020 – «Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств изделий для судостроения и морской техники» / утверждён и введён в действие приказом Росстандарта № 946-ст от 27.10.2020.
11. Дектярев, А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №4 (38). – С. 76-82.
12. Чабаненко А.В. «Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям» диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. СПб, 2019 г. – 217 с.

References

1. Onlajn spravochnik plastikov i polimerov. [Elektronnyj resurs] [Online directory of plastics and polymers. / [Electronic resource]] – Rezhim dostupa: <https://e-plastic.ru/spravochnik/materiali/> (data obrashcheniya: 03.10.21)
2. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov, chast' XVI. Konstrukciya i prochnost' sudov iz polimernyh kompozicionnyh materialov. Rossijskij Morskoy Registr Sudohodstva [Rules for the classification and Construction of naval vessels, part XVI. Construction and strength of vessels made of polymer composite materials. Russian Maritime Register of Shipping] – SPb, 2021. – 173 p.
3. GOST 4651-2014 – «Plastmassy. Metod ispytaniya na szhatie» [Plastics. Compression test method] / Standartinform. Data vvedeniya 01.03.2015.
4. GOST R 58597-2019 – «Additivnye tekhnologii. Mery nerazrushayushchego kontrolya, izgotovlennye metodami additivnyh tekhnologij» [Additive technologies. Non-destructive testing measures manufactured by additive technologies] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 989-st 15.10.2019.
5. GOST R 58598-2019 – «Additivnye tekhnologii. Vidy i metody nerazrushayushchego kontrolya izdelij» [Additive technologies. Types and methods of non-destructive testing of products] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 990-st 15.10.2019.
6. GOST R 58600-2019 – «Additivnye tekhnologii. Nerazrushayushchij kontrol' metallicheskih izdelij, izgotovlennyh metodami additivnyh tekhnologij. Osnovnye polozheniya» [Additive technologies. Non-destructive testing of metal products manufactured using additive technologies. Basic provisions] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 994-st 15.10.2019.
7. GOST R 59095-2020 – «Materialy dlya additivnogo stroitel'nogo proizvodstva. Terminy i opredeleniya» [Materials for additive construction production. Terms and definitions] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 789-st 09.10.2020.
8. GOST R 59096-2020 – «Materialy dlya additivnogo stroitel'nogo proizvodstva. Metody ispytaniy» [Materials for additive construction production. Test methods] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 790-st 09.10.2020.
9. GOST R 59097-2020 – «Materialy dlya additivnogo stroitel'nogo proizvodstva. Tekhnicheskie trebovaniya» [Materials for additive construction production. Technical requirements] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 791-st 09.10.2020.
10. GOST R 59130-2020 – «Additivnye tekhnologii. Podtverzhenie kachestva i svojstv izdelij dlya sudostroeniya i morskoy tekhniki» [Additive technologies. Confirmation of the quality and properties of products for shipbuilding and marine equipment] / utverzhdyon i vvedyon v dejstvie prikazom Rosstandarta № 946-st ot 27.10.2020.
11. Dektyarev A.V., Morozov V.N. Additivnye tekhnologii v sudostroitel'noj promyshlennosti i perspektivy ih razvitiya [Additive technologies in the shipbuilding industry and prospects for their development] Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2017. – №4 (38). – Pp. 76-82.
12. Chabanenko A.V. Modeli i metodiki obespecheniya kachestva korpusnyh elementov, vypolnennyh po additivnym tekhnologiyam [Models and methods of ensuring the quality of housing elements made using additive technologies] dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Spb, 2019. – 217 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Рашидович Рубан, кандидат технических наук, доцент, директор института морских технологий, энергетики и транспорта, профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Павел Денисович Полухин, аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Астрахань, ул. Татищева 16, e-mail: 99ppd99@gmail.com

Гурий Алексеевич Кушнер, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, Астраханский Государственный Технический Университет, 414056, г. Астрахань, ул.Татищева, 16, e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Anatoliy R. Ruban, Ph. D. (Eng), assistant professor, Director of the Institute of Marine Technologies, Energy and Transport, professor of the Shipbuilding and power complexes of marine technology department, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University», Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Pavel D. Polukhin, graduate student of the Shipbuilding and power complexes of marine technology department, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University», Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: 99ppd99@gmail.com

Guriy A. Kushner, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering, Tatisheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Дмитрий Александрович Волков, аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Астрахань, ул. Татищева 16, e-mail: volkovdima95@mail.ru

Dmitri A. Volkov, graduate student of the Shipbuilding and power complexes of marine technology department, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University», Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: volkovdima95@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 18.11.2022.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 621.316.722.

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.027>

Алгоритмы расчета устройства компенсации неактивной мощности преобразователя частоты для СЭЭС

Б.Ф. Дмитриев¹ dmitrievbf@yandex.ru, С.Я. Галушин¹ gs@smtu.ru, И.А. Федотова¹ fedotovaia@hotmail.com, К.В. Балицкая¹ baliksenia@ya.ru, А.Ю. Розов¹ rozov33@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Управление режимами работы гребного электрического двигателя (ГЭД) осуществляется полупроводниковыми преобразователями частоты, применение которых значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах СЭЭС. Основными причинами являются уменьшение коэффициента мощности и появление высших гармоник в потребляемом токе. В результате этого снижается надежность работы потребителей, и увеличиваются потери электроэнергии. Поэтому уменьшение указанных негативных последствий является актуальной задачей для судовой электроэнергетики.

В связи с этим, большое внимание уделяется вопросам, связанным с изучением и разработкой различных методов и устройств обеспечения качества электроэнергии, увеличения коэффициента мощности и фильтрации высших гармоник. В настоящее время, перспективным методом улучшения качества электроэнергии, является применение устройств управления реактивной мощностью и активной фильтрации, т.е. компенсаторов неактивной мощности.

Ключевые слова: электрическая энергия, качество электрической энергии, преобразователь частоты, активный фильтр, компенсатор реактивной мощности.

Для цитирования: Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Федотова И.А., Балицкая К.В., Розов А.Ю. Алгоритмы расчета устройства компенсации неактивной мощности преобразователя частоты для СЭЭС Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 82—92.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.027>

Algorithms for calculation of inactive power compensation device of frequency converter for marine systems

Boris F. Dmitriev¹ dmitrievbf@yandex.ru, Sergey Ya. Galushin¹ gs@smtu.ru, Iraida A. Fedotova¹ fedotovaia@hotmail.com, Ksenya V. Balitskaya¹ baliksenia@ya.ru, Alexei J. Rozov¹ rozov33@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Annotation. The control of the operating modes of the propulsion electric motor (PEM) is carried out by semiconductor frequency converters, the use of which significantly worsens the quality of electricity on the common buses of the Marine Power Systems. The main reasons are a decrease in the power factor and the appearance of higher harmonics in the consumed current. As a result of this, the reliability of consumers' operation decreases, and power losses increase. Therefore, reducing these negative consequences is an urgent task for the ship power industry.

In this regard, much attention is paid to issues related to the study and development of various methods and devices for ensuring the quality of electricity, increasing the power factor, and filtering higher harmonics. Currently, a promising method for improving the quality of electricity is the use of reactive power control and active filtering devices. That is inactive power compensators.

Keywords: electrical energy, quality of electrical energy, frequency converter, active filter, reactive power compensator.

For citation: Boris F. Dmitriev, Sergey Ya. Galushin, Iraida A. Fedotova, Ksenya V. Balitskaya, Alexei J. Rozov Algorithms for calculation of inactive power compensation device of frequency converter for marine systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 82—92.

Введение

Структуры судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) значительно многообразнее, чем традиционные системы электроснабжения. Кроме того, вопросы проектирования транспортных систем имеют свою специфику, которая учитывает прежде всего критерии эффективности, параметры

электроэнергии и электромагнитную совместимость оборудования (особенности совместной работы основных функциональных узлов источник-преобразователь, преобразователь-преобразователь) и, в связи с этим их оптимизацию [1, 2].

Как известно, структура СЭЭС определяется потребителями электроэнергии (рис. 1), а

критериями ее эффективности служат масса, коэффициент полезного действия, показатели надежности и качества электроэнергии, суммарные затраты, связанные со стоимостью и эксплуатацией. В большинстве случаев критерий массы для транспортных СЭЭС является приоритетным. Коэффициент полезного действия (КПД) СЭЭС определяет эффективность преобразования электроэнергии. При оптимизации СЭЭС критерии массы и КПД противоречивы. Например, с увеличением мощности источника электроэнергии, а значит, и массы повышается его КПД. Основные критерии надежности СЭЭС – интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и наработка до первого отказа [3, 6, 10, 13, 14].

Требования к качеству электроэнергии определяются потребителями и непосредственно влияют на конструктивные и схемные особенности, массу и стоимость источников и преобразователей электроэнергии. Кроме того, развитие научно-технического прогресса потребовало разработки СЭЭС, которые по техническим требованиям не должны допускать перерывов в электроснабжении. Поэтому современные СЭЭС ответственных электроприемников должны выполняться повышенной надежности, т.е. источники и преобразователи электроэнергии следует резервировать, а это приводит, соответственно, к увеличению массы и стоимости систем.

При проектировании СЭЭС необходимо учитывать условия работы (прежде всего – климатические) и особенности эксплуатации (повышенные динамические и вибрационные нагрузки), а также проблему электромагнитной совместимости устройств из-за компактного размещения оборудования [1, 2].

Повышение автономности функционирования СЭЭС, улучшение их массогабаритных показателей при жестких требованиях к ним по качеству электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей возможно на основе использования на транспортных агрегатах малогабаритных систем с рациональной структурой построения и оптимальными параметрами электроэнергии по сравнению с существующими, что во многом зависит от правильного выбора перспективных приводных двигателей, источников и преобразователей, коммутационной аппаратуры.

От параметров электроэнергии зависят характеристики СЭЭС, поэтому при выборе вида тока и, соответственно, источника необходимо учитывать следующие факторы. Системы переменного тока включают компактные электрические машины, преобразователи электроэнергии и коммутационные устройства.

Важным показателем является мощность СЭЭС, от которой зависят критерии эффективности системы в целом. Значение ее определяется потребителями. Для ответственных потребителей необходимо создать оптимальный резерв источников и преобразователей [3, 4, 5, 12].

Для современных судов и кораблей созданы эффективные системы электродвижения на основе гребных электрических двигателей (ГЭД) с винторулевой колонкой (ВРК). Они обеспечивают высокую маневренность судов и кораблей в различных режимах движения. В целях более

эффективного использования электрооборудования, ГЭД с ВРК получают электропитание от единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС).

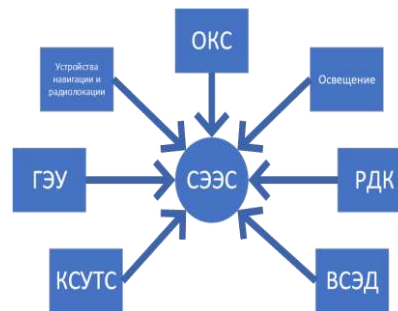


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи СЭЭС с основными системами судна; (КСУТС – комплексная система управления технологическими средствами; ГЭУ – гребная энергетическая установка; ОКС – общекорабельные системы; РДК – резервно-двигательный комплекс; ВСЭД – вспомогательная система электродвижения.)

Управление режимами работы ГЭД осуществляется полупроводниковыми преобразователями частоты, применение которых значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах ЕЭЭС.

Энергетические характеристики данного устройства определяются следующими параметрами:

- напряжение сети, к которой подключается КНМ;
- параметры преобразователя частоты, включая в нем трансформатор связи (повышающий трансформатор);
- требуемая величина пускового момента гребного двигателя;
- требуемое время пуска (если необходимо);
- допустимый коэффициент гармонических искажений напряжения и тока в точке подключения компенсатора;
- сопротивление питающей сети.

Эти данные позволяют определить следующие основные энергетические характеристики компенсатора неактивной мощности для пропульсивного комплекса:

- величину тока компенсатора в статическом режиме и в режимах снижения номинальной мощности ВРК;
- величину энергии, расходуемую компенсатором во время работы.

По значению напряжения сети, к которой подключается компенсатор, величине максимального тока компенсатора и допустимой величине гармонических искажений тока и напряжения компенсатора выбирается топология схемы преобразователя компенсатора. [1, 2]

Результатом расчёта являются следующие параметры силовых элементов компенсатора неактивной мощности:

- тип ключевых элементов, класс напряжения и тока;
- частота коммутации;
- величина тепловых потерь в ключевых элементах в пусковом и статическом

режимах работы двигателя и параметры системы отвода тепла от ключа;

- тип накопителя;
- максимальное и номинальное рабочее напряжение;
- энергоемкость;
- величина пульсаций напряжения на накопителе.

Параметры дросселей фильтров на стороне переменного тока преобразователя:

- индуктивность;
- величина падения напряжения на дросселе основной и модуляционной гармоник в пусковом и статическом режимах работы двигателя;
- потери мощности в дросселе.

Для улучшения качества генерируемого тока компенсатора на стороне переменного тока могут использоваться пассивные LC фильтры, настроенные на резонанс на частоте коммутации ключевых элементов компенсатора. В таком случае необходимо рассчитать параметры этого фильтра обеспечивающего заданную величину ослабления высших гармоник тока компенсатора [15].

Ключевые полупроводниковые элементы компенсатора работают в ключевом режиме причем потери от коммутации (потери коммутации) обычно превышают потери проводимости. Поэтому рабочее значение тока полупроводниковых элементов зависит от условий их эксплуатации: частоты коммутации, напряжения на стороне постоянного тока преобразователя (коммутируемое напряжение).

При компенсации неактивной мощности, до 10МВ, целесообразно применять двухуровневые трехфазные схемы, особенно в судовой и корабельной ЭЭС, где нулевой провод отсутствует. Это связано с тем, что данные схемы силовой части

не позволяют пропускать высшие гармоники 17-ю и 19-ю. Такие гармоники являются источниками безопасности, поскольку они вызывают самозапуск боевых запчастей и также участвуют в ложной выдаче сигнала в системе радиолокации [15].

Существует варианты решения вопроса компенсации неактивной мощности. Одним из них является использование выше предлагаемых топологий. При применении дополнительных алгоритмов управления, одна и та же схема может выполнять роль КРМ, а также АФ. Другим вариантом является сочетание в одном устройстве двух схем одновременно для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления (рис.2). Преимуществами второго варианта являются следующие:

- Существенное снижение потерь мощности в устройствах. Это объясняется тем, что потери мощности на ключах пропорционально зависит от произведения тока на ключах и частоты коммутации. Мощность высших гармоник потребляемого тока существенно ниже, чем реактивная мощность, поэтому можно выбрать различные типы ключей с существенно более высокой частотой коммутации для АФ, имея при этом меньшие потери мощности.
- Достаточно простая система управления.
- Низкая стоимость. Это обусловлено тем, что электронные ключи на большие мощности с высокой частотой коммутации на порядок дороже обычные ключи. С применением объединенной схемой, можно выбрать ключи на большие мощности с низкой частотой коммутации.

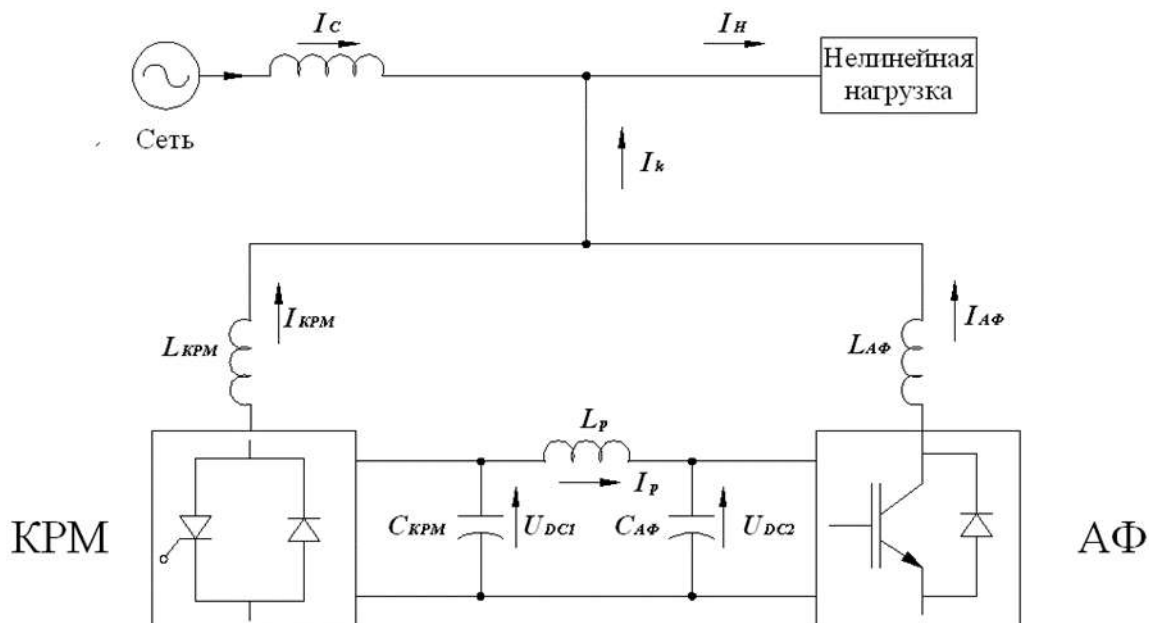


Рис. 2. Пример обобщенной схемы разрабатываемого компенсатора неактивной мощности

Благодаря использованию КРМ и АФ при объединении в одном устройстве,

разрабатываемый компенсатор неактивной мощности имеет следующие особенности:

- Низкочастотный преобразователь используется для компенсации реактивной мощности.
- Преобразователь повышенной частоты низкого напряжения используется для компенсации высших гармоник тока сети, то есть выполняет функции активного фильтра.
- Оба силовых преобразователя совместно используют одно и то же звено цепи постоянного тока с накопительными конденсаторами, разделенными через индуктивный реактор для их гальванической развязки.
- Активный фильтр выполняется на силовых ключах с малой токовой нагрузкой, обусловленной только высшими гармониками тока, и может работать от более низкого напряжения на стороне постоянного тока (при наличии повышающего трансформатора на выходе).
- При использовании собственного экранирования в "развязывающем" трансформаторе на выходе инвертора, обеспечивающего повышение ЭМС.

Функция КРМ состоит в компенсации реактивной мощности, и он рассчитывается на реактивную мощность основной, первой гармоники. Другая силовая часть выполняет функцию фильтрации высших гармоник тока. Для снижения стоимости и упрощения схемы управления, преобразователи КРМ и АФ используют общее звено постоянного тока с индуктивным фильтром развязки накопительных конденсаторов. Она необходима для исключения токов, обусловленных разницей частот пульсаций на накопительных конденсаторах $S_{КРМ}$ и $S_{АФ}$ (рис 2). Из изложенного следует, что предлагаемая топология устройства способна обеспечить эффективную компенсацию неактивной мощности при меньших стоимостных затратах.

В свою очередь частота коммутации, напряжение на стороне постоянного тока преобразователя и величина индуктивности дросселя фильтра определяют содержание высших гармоник в токе компенсатора. Величина индуктивности дросселя фильтра, напряжение сети, максимальная величина тока компенсатора, а также используемый метод модуляции напряжения преобразователя определяют напряжение на стороне постоянного тока преобразователя. Величина напряжения на стороне постоянного тока преобразователя, ток компенсатора и частота коммутации определяет величину тепловых потерь ключевого элемента, параметры и тип используемой системы охлаждения. Таким образом, рабочее значение тока полупроводниковых элементов, частота коммутации, напряжение на стороне постоянного тока преобразователя и другие параметры компенсатора являются взаимозависимыми, что приводит к

необходимости использовать итерационный метод расчёта и выбора этих параметров.

В данном методе сделаем следующие допущения:

1. Режим пускового асинхронного гребного двигателя пропульсивной системы не рассматривается, поскольку данный режим был освещен в ряде работ.
2. Падение напряжения в преобразователе частоты незначительно.
3. Также считается, что сопротивления индуктивной катушки и емкостного накопителя незначительны.

На рис.3 показана блок-схема алгоритма расчета параметров силовой части активного фильтра.

Методика расчёта включает в себя девять этапов.

На первом этапе (блок №1 рис.3) осуществляется расчёт требуемых энергетических характеристик АФ и выбор топологии схемы его преобразователя.

На втором этапе (блок №2, рис. 3) рассчитываются и выбираются полупроводниковые ключевые элементы преобразователя. Как известно, что в компенсаторах небольшой мощности (до 10МВА) и напряжения (до 10кВ), обычно используется двухуровневая трёхфазная топология схемы преобразователя с применением биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзистор) [6]. Достоинствами IGBT-транзистор являются низкие потери при коммутации и возможность использования без цепей формирования траектории переключения (ЦФТП), что уменьшает сложность конструкции и управлением преобразователем. Значение фазного тока компенсатора $I_{КОМП}$. [15]

$$I_{КОМП} = \frac{Q_{КОМП.н}}{3U_{\phi}} \quad (1)$$

Активная и реактивная мощность компенсатора зависят от напряжения сети на шинах подключения U_c , напряжения компенсатора $U_{КОМП}$, сопротивления дросселя на основной частоте x_{qp} , величины угла сдвига между напряжениями сети и компенсатора φ [15]:

$$Q = 3 \cdot \left[\frac{U_{КОМП}^2}{x_{qp}} - \frac{U_c \cdot U_{КОМП}}{x_{qp}} \cdot \cos \varphi \right]$$

$$P = 3 \cdot \frac{U_c \cdot U_{КОМП}}{x_{qp}} \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

Из уравнений (2) видно, что генерирование или потребление реактивной мощности преобразователем (при условии $\varphi = 0$) определяется соотношением величин U_c и $U_{КОМП}$. При $U_c < U_{КОМП}$ осуществляется режим генерирования реактивной мощности ($Q > 0$), а при $U_c > U_{КОМП}$ осуществляется режим потребления ($Q < 0$).

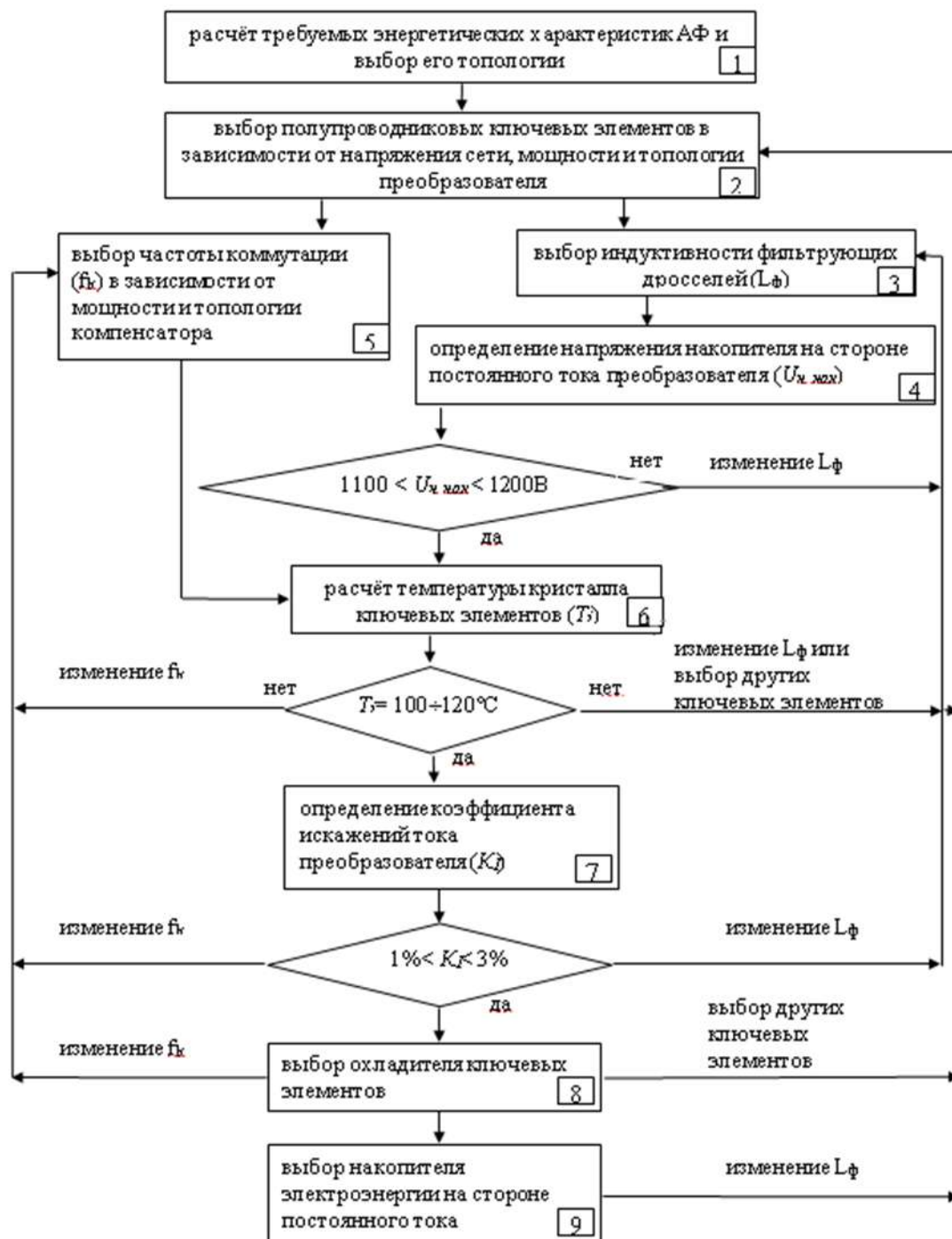


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта параметров силовой части АФ.

При использовании векторной широтно-импульсной модуляции соотношение между максимально-возможной амплитудой фазного напряжения преобразователя и напряжением на стороне постоянного тока в линейном диапазоне модуляции равно 0,578 [15]. Тогда максимальное значение амплитуды фазного напряжения преобразователя ($U_{\text{комп_амп_макс}}$) равно [15]:

$$U_{\text{комп_амп_макс}} = 0,578 \cdot U_d, \quad (3)$$

где U_d напряжение на стороне постоянного тока преобразователя.

На третьем этапе выбирается индуктивность дросселя фильтра на стороне переменного тока преобразователя, исходя из условий ограничения на достаточно низком уровне гармонических составляющих токов на выходе компенсатора. Исследования показали, что параметры дросселя оптимальны при падении напряжения в нем от номинального тока в пределах 15÷30 % от номинального напряжения сети [15]. В первом приближении можно принять величину падения

напряжения на дросселе 15%. Это напряжение на дросселе при протекании номинального тока компенсатора. Индуктивность дросселя равна:

$$L = \frac{U_d}{I_{\text{компл}} \cdot 2\pi f_0} = \frac{U_c \cdot 0,2}{I_{\text{компл}} \cdot 2\pi f_0} \quad (4)$$

где U_d - падение напряжения на дросселе, равное 20% от напряжения сети ($V_{qp} = 0,2V_c$).

На четвёртом этапе определяется напряжение накопителя на стороне постоянного тока преобразователя. Напряжение на стороне постоянного тока зависит от максимального фазного напряжения компенсатора (3). Фазное напряжение компенсатора максимально в режиме генерации реактивной мощности, и равно сумме напряжения сети V_c и падения напряжения на дросселе V_f , что составляет 120% от напряжения сети. Однако необходимо учесть запас 10% из-за пульсаций напряжения на накопителе (порядка 5%) и возможному разряду накопителя на 5% в переходных режимах работы. Напряжение на конденсаторе находится по формуле:

$$U_d = \frac{U_{\text{компл_амп_макс}}}{0,578} = \frac{U_c \cdot \text{амп} \cdot 1,2}{0,578} \cdot 1,1 \quad (5)$$

На пятом этапе выбирается частота коммутации ключевых элементов компенсатора. В первом приближении её можно выбрать в зависимости от мощности компенсатора, топологии его схемы и использующихся полупроводниковых ключевых элементов. В преобразователях с коммутируемым током до 3кА и напряжением до 3кВ, с частотой свыше 1кГц, обычно используются IGBT-транзисторы. Компенсатор с двухуровневой трёхфазной топологией схемы преобразователя, имеющего мощность 500 кВ·А, частота коммутации IGBT-транзисторов обычно находится в диапазоне 1÷3кГц. В первом приближении выбираем частоту коммутации 2,7кГц [6].

На шестом этапе осуществляется расчёт температуры кристалла ключевых элементов. В технических данных к IGBT-транзисторам приводятся зависимость напряжения коллектор-эмиттер транзистора (U_{CE}) от тока (I_C), протекающего через ключ и зависимости энергий, выделяющихся в ключе при включении (E_{on}) и выключении (E_{off}), от значения коммутируемого тока. Используя эти данные, можно отдельно рассчитать потери проводимости и потери коммутации. Тепловые потери, выделяющиеся в ключе, приводят к повышению температуры кристалла полупроводника, поэтому необходимо рассчитать максимально-допустимое значение мощности тепловых потерь, с учётом возможности по отводу этого тепла. Для обратного диода IGBT-транзисторы расчёт осуществляется независимо от транзистора, так как считается, что обратный диод имеет своё тепловое сопротивление «кристалл-корпус», отличное от теплового сопротивления транзистора [6].

На начальном этапе расчёта можно принять, что максимальное значение температуры радиатора не превышает некоторого значения (обычно 70°÷80°). С использованием данных о коммутируемых токе и напряжении, а также частоты коммутации, можно рассчитать мощность тепловых потерь ключа.

Используя значения теплового сопротивления «кристалл-корпус» и «корпус-радиатор», можно рассчитать температуру кристалла и корпуса транзистора [6].

На седьмом этапе определяется коэффициент искажений тока преобразователя (K_i). При этом используются значения: напряжение на стороне постоянного тока преобразователя, индуктивность дросселя фильтра, частота коммутации транзисторов. Расчёт качества генерации тока компенсатора осуществляется при помощи математической модели компенсатора. Для оценки коэффициента гармонических искажений тока можно использовать преобразование Фурье для определения содержания высших гармоник тока на частоте коммутации.

На восьмом этапе приводится выбор охладителя ключевых элементов. Охладитель может быть выбран из каталога, где указывает максимально допустимая выделяемая температура.

На девятом этапе выбирается накопитель электроэнергии на стороне постоянного тока. Генерация реактивной мощности компенсатором не вызывает пульсации напряжения на его накопителе в случае сбалансированности напряжения сети и тока компенсатора. Необходимо определить максимальную величину угла ошибки синхронизации и допустимое время действия этого режима. По данным математического моделирования [15] максимальное значение средней ошибки равно 0,5° в течение 0,05с. Поток активной мощности по формуле (2) в этом случае равен:

$$P = 3 \frac{U_c U_{\text{компл}}}{x_d} \sin \phi = 3 \frac{U_c^2 \cdot 1,2}{x_d} \sin \phi \quad (6)$$

где $U_{\text{компл}} = U_c \cdot 1,2$, так как напряжение компенсатора в случае генерации реактивной мощности больше на 20% напряжения сети.

На стороне постоянного тока, отдаваемая конденсатором энергия связана с изменением напряжения на нем $\Delta U_{\text{кр}}$ следующим образом:

$$\Delta W_{\text{нак}} = \frac{C \cdot U_{\text{нак}}^2}{2} - \frac{C \cdot U_{\text{min_нак}}^2}{2}, \quad (7)$$

где $U_{\text{нак}}$ - номинальное напряжение на накопительном конденсаторе, $U_{\text{min_нак}}$ - минимально-допустимое напряжение.

Таким образом, ёмкость накопительного конденсатора зависит от минимально-допустимого напряжения на конденсаторе:

$$C = \frac{2 \cdot \Delta W_{\text{нак}}}{U_{\text{нак}}^2 - U_{\text{min_нак}}^2}. \quad (8)$$

Максимальное рабочее напряжение электролитического конденсатора должно в 1,3÷1,5 превышать номинальное рабочее. Исходя из этого, выбираем в качестве накопителя электролитический конденсатор, с требуемым номинальным напряжением.

Алгоритм расчета силовой части компенсатора реактивной мощности (КРМ)

При расчете силовой части КРМ необходимо определить его параметры, исходя из требований по компенсации реактивной мощности.

В процессе расчета силовой части КРМ определяются следующие показатели:

- Номинальное фазное напряжение компенсатора реактивной мощности
- Номинальная мощность компенсатора реактивной мощности
- Номинальная генерируемая реактивная мощность
- Номинальная потребляемая реактивная мощность
- Диапазон регулирования реактивная мощность

Как вышнее отмечено, для компенсации неактивной мощности до 10 МВт, целесообразно применять двухуровневую мостовую схему. Однако, малое число уровней напряжения может вызывать необходимость ШИМ-управления для снижения уровня гармоник в фазном токе. Основным элементом, определяющими стоимостные и массогабаритные показатели КРМ, являются:

- конденсаторная батарея
- фазные реакторы
- силовые электронные ключи (GTO-тиристоры с обратными диодами)

На рис. 4. показана блок-схема алгоритма расчета элементов силовой части КРМ.

На первом этапе определяется установленная мощность, исходя из постановки задачи.

На втором этапе направляется выбор топологии схемы силовой части КРМ в зависимости от параметров сети и мощности компенсации, необходимой для данного устройства.

На третьем этапе приводится расчет основных параметров КРМ. Входными данными для расчета являются:

- Номинальная установленная реактивная мощность Q_n (1 МВар);
- Номинальное рабочее напряжение U_n (0,4 кВ) и диапазон его изменения.

Согласно [30, 31], номинальное действующее значение фазного тока определяется по формуле:

$$I_\phi = \frac{Q_n \sqrt{3}}{3U_n} \quad (9)$$

Эквивалентный фазный импеданс, на выбор величины которого влияют несколько важных параметров преобразователя напряжения:

- уровень рабочего напряжения в цепи постоянного тока в режиме генерации реактивной мощности. В этом режиме напряжение имеет максимальное значение.
- размах пульсаций тока в фазных реакторах и соответственно уровень гармоник тока в реакторе.
- амплитуда аварийного тока при пробое плеча.

Относительная величина эквивалентного фазного импеданса выбирается в пределах 10...24%.

$$Z_\phi = \frac{U_n}{I_\phi \sqrt{3}} \quad (10)$$

$$Z_p = 0,15 \cdot Z_\phi$$

Индуктивность фазного реактора рассчитывается следующим образом:

$$L_p = \frac{Z_p}{2\pi f} = \frac{Z_p}{100\pi} \quad (11)$$

Амплитуда первой гармоники напряжения на фазном реакторе при I_n :

$$U_p = \sqrt{2} Z_p I_\phi \quad (12)$$

При симметричной сети и нагрузке величина линейного напряжения инвертора определяется:

$$U_u = 2Z_p I_\phi \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + U_n \quad (13)$$

$$U \sqrt{2} u_{u,max}$$

Среднее значение напряжение на полюсах преобразователя напряжения (ПН) в режиме генерации номинального значения реактивной мощности и при номинальном напряжении сети зависит от значения коэффициента модуляции.

Так, при коэффициенте модуляции, равном единице, среднее значение напряжения в цепи постоянного тока и амплитуда линейного напряжения равны между собой и имеют величину:

$$U_{KB} = \sqrt{2} U_n + \sqrt{3} U_p \quad (14)$$

$$U \frac{U_{KB}}{K_m K_{KB,max}} \quad (15)$$

где K_m – коэффициент модуляции

Максимальное рабочее напряжение силовых ключей в генераторном режиме должно обеспечивать максимальный размах пульсаций напряжения на конденсаторной батарее с учетом ограничения уровнем 5% от ее номинального напряжения. Поэтому:

$$U_{VT} = 1,05 U_{KB,max}$$

$$U_{VT,min} = \sqrt{2} \frac{U_n - 2I_\phi Z_\phi \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)}{K_m} \quad (16)$$

На четвертом этапе проводится выбор типа силового модуля на основе тепловых потерь. Частота коммутации таких ключей выбирается из условия, что КРМ предназначен для компенсации реактивной мощности. Как известно, что частота коммутации является ключевым параметром эффективности преобразователя напряжения, который непосредственно определяет:

- качество напряжения в точке подключения;
- потери в преобразователях напряжения;
- мощность фильтров.

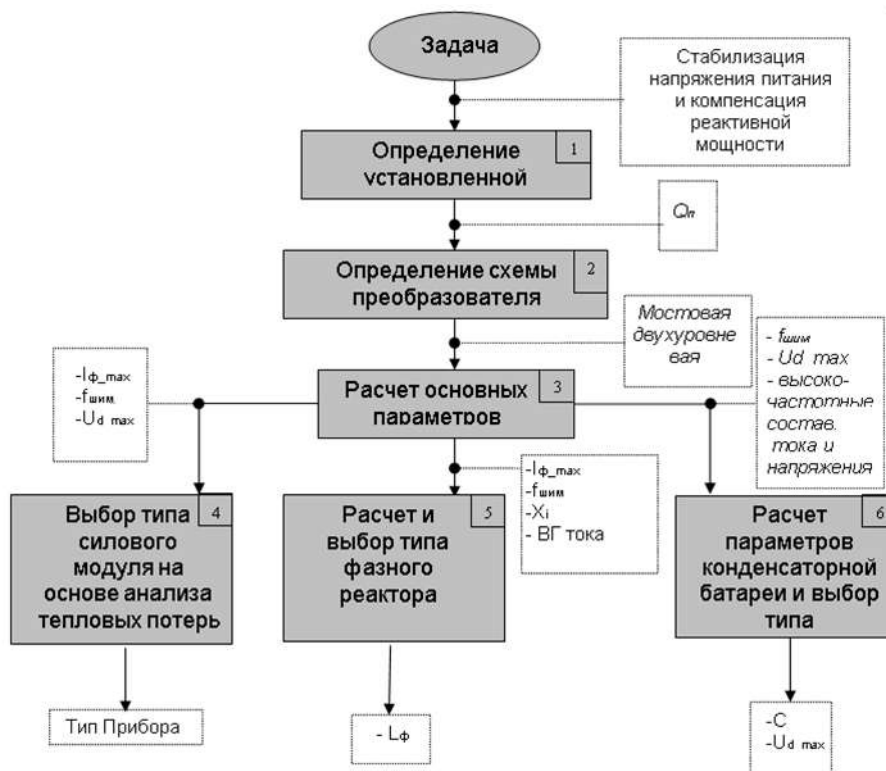


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета параметров силовой части КРМ

Оптимальный выбор частоты коммутации позволяет минимизировать полные затраты на весь период эксплуатации оборудования. Вторичными факторами влияния частоты коммутации на эффективность работы оборудования преобразователя напряжения являются:

- повышенные требования к фазным реакторам и конденсаторам;
- снижение надежности силового электрооборудования из-за повышенных динамических воздействий.

Задача выполнения количественных оценок влияния на эффективность всех перечисленных факторов является достаточно сложной, поэтому выбор оптимальной частоты коммутации приводится по нормативным показателям, описанным в [1,2], где для сети с номинальным напряжением 0.38кВ нормально допустимое значение коэффициента искажения несинусоидальности $THD = 8\%$, а предельно допустимое соответственно 12%. При этом категории оценки для выбора частоты коммутации являются такими:

- не превышением заданных параметров несинусоидальности напряжения в точке подключения;
- не превышением допустимого уровня потерь в транзисторах;

Выбор силового модуля осуществляется, исходя из максимальных значений коммутируемого тока и напряжения. В непроводящем состоянии к тиристоры прикладывается напряжение накопительного конденсатора. В устройствах, рассчитанных на работу с сетью напряжением 400В, обычно выбираются тиристоры по величине тока коллектора-эмиттера. Для обеспечения надежной работы в переходных режимах, необходимо

выбирать тиристоры с запасом по току в 1.2 – 1.5 раза.

Применяя программу MELCOSIM [15], расчет дает возможность сравнить показатели потерь для различных типов силовых GTO-модулей, подходящих для использования в данной схеме. После предварительного выбора типа тиристора необходимо выполнить проверочный расчет с целью определения мощности тепловых потерь, выделяющихся в ключе, которые приводят к повышению температуры полупроводника.

На пятом этапе проводится расчет фазного реактора. Согласно формуле (11), определяется значение индуктивности фазного реактора.

На шестом этапе рассчитывается величина емкости конденсаторной батареи. Как известно, в преобразовательной технике, в качестве емкостных накопителей энергии широко применяются электролитические конденсаторы, существенным недостатком которых является снижение значения емкости с ростом частоты. Поэтому при выборе типа конденсатора недостаточно, если знать только его номинальную емкость и рабочее напряжение, но и необходимо учитывать также ряд специфических параметров, таких как эквивалентная индуктивность и тангенс угла диэлектрических потерь на заданной частоте.

Параметры конденсаторной батареи определяются исходя из условий:

- пульсации напряжения, обусловленные генерацией реактивной мощности и небалансом напряжения в точке подключения, должны быть меньше допустимых для данного типа КРМ;
- обеспечение требуемого времени, необходимого для разряда/заряда КБ при изменении знака мощности.

Номинальное рабочее напряжение на накопительном конденсаторе определяется исходя из условий:

- с запасом 0,8 от номинального напряжения конденсатора указанного изготовителем;
- с запасом 0,6 от допустимого напряжения, приложенного на тиристоре преобразователя напряжения;
- должно быть достаточным для генерации напряжения, необходимого для стабилизации напряжения в точке подключения;
- должно быть достаточным для компенсации реактивной мощности.

Выводы

1. Для устройств компенсации большой неактивной мощности (>10МВА) предпочтительней использовать схему с "H" топологией. Эта схема имеет меньшее количество силовых элементов по сравнению трехфазной многоуровневой, снимает проблему небаланса напряжений на накопительных конденсаторах, позволяет управлять напряжением каждой фазы.
2. Для схем компенсации неактивной мощности в трехфазных сетях с напряжением свыше 1000В и низкочастотным спектром гармоник тока может

быть успешно применен метод их избирательного исключения.

3. Компенсаторы неактивной мощности менее 10МВА могут быть успешно реализованы на основе трехфазных двухуровневых схем с топологией отдельных схем для силовой части-компенсации реактивной мощности основной гармоники и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления и в едином конструктивном исполнении. Это дает возможность использовать для компенсирующей части силовоточные и низкочастотные ключи, а в фильтрующей высокочастотные с небольшими токами. Такая топология позволяет также с малыми затратами создавать модификации компенсатора с различными требованиями к частотному спектру фильтруемых гармоник тока.
4. В компенсаторах небольшой мощности, где частота коммутации ключевых элементов составляет свыше 1 кГц, в основном используется биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT-транзистор). Если частота коммутации меньше 500Гц, можно использовать KPM GTO-тиристоры и также MOSFET-транзисторы для активной фильтрации, если частота устраняемых высших гармоник высокая.

Литература

1. Российский морской Регистр судоходства. – Правила классификации и постройки морских судов. НД 2-020101-138: Часть XI, Электрическое оборудование. СПб, 2021.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
3. Ясаков Г.С., Ромадан А., Томилин С.А. Состояние и перспективы развития регулируемого электропривода в корабельных электроэнергетических системах. Межотраслевая научно-практическая конференция. «ВОКОР-2006».
4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). – СПб: Электросила, 2003. 172 с.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АCADEMA, 2006, 264 с.
6. Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике. Электротехника, №11, 2005.
7. Дмитриев Б.Ф., Лихоманов А.М., Агунов А.В. Синтез управления качеством стабилизации и регулирования параметров электроэнергии. К: Техническая электродинамика, 2000. с. 14-15.
8. Вербова Н.В., Агунов А.В. Силовое активно-фильтро-компенсирующее устройство с системой управления по отклонению. Судостроение, №1, 2020. с. 16-18.
9. Агунов А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки. Электротехника, №2, 2003. с. 24-27.
10. Дмитриев Б.Ф., Ратников И.В., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Анализ и синтез гармонического состава выходного напряжения регуляторов переменного тока в автономных системах электропитания с импульсной нагрузкой // Морской Вестник, Спец. выпуск №1(9), 2012. с. 78-81.
11. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Егорова А.Д. Средства повышения качества электрической энергии в СЭС. Морской Вестник, №3(75), 2020. с. 77-80.
12. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Балицкая К.В. Обоснование и выбор инвертора напряжения при реализации однофазных источников бесперебойного питания для средств судовой автоматики, IV Научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2020. «Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2020»: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, г. Самара, 2020. – 269-270 с.
13. Колпаков А.Н. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей. Силовая электроника, №2, 2007.
14. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Корнев А.С., Балицкая К.В. Устройство компенсации неактивной мощности в преобразователях частоты в составе электроэнергетических систем морских транспортных средств. // Морские интеллектуальные технологии, 2021г, №4, том 2. Стр.118-123.
15. Кочкин В.Н., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 248 с.

References

1. Rossiyskiy morskoy Registr sudokhodstva. – Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Vessels] ND 2-020101-138: Chast' XI, Elektricheskoe oborudovanie. SPb, 2021.
2. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobrazovaniya obshchego naznacheniya. [Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems] Moskva: Standartinform, 2014. 19 s.
3. Yasakov G.S., Romadan A., Tomilin S.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya reguliruemogo elektroprivoda v korabel'nykh elektroenergeticheskikh sistemakh. [State and prospects for the development of a controlled electric drive in shipboard electric power systems] Mezhotraslevaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. «VOKOR-2006».
4. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet).[Power fully controlled semiconductor converters (simulation and calculation)] – SPb: Elektrosila, 2003. 172 s.
5. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem.[VFD AC Drives] M.: ACADEMA, 2006, 264 s.
6. Lazarev G.B. Moshchnye vysokovol'tnye preobrazovateli chastoty dlya reguliruemogo elektroprivoda v elektroenergetike.[Powerful high-voltage frequency converters for variable speed drive in the electric power industry] Elektrotehnika, №11, 2005.
7. Dmitriev B.F., Likhomanov A.M., Agunov A.V. Sintez upravleniya kachestvom stabilizatsii i regulirovaniya parametrov elektroenergii.[Synthesis of quality control of stabilization and regulation of electric power parameters] K: Tekhnicheskaya elektrodinamika, 2000. s. 14-15.
8. Verbova N.V., Agunov A.V. Silovoe aktivno-fil'tro-kompensiruyushchee ustroystvo s sistemoy upravleniya po otkloneniyu.[Power active-filter-compensating device with deviation control system] Sudostroenie, №1, 2020. s. 16-18.
9. Agunov A.V. Sticheskiy kompensator neaktivnykh sostavlyayushchikh moshchnosti s polnoy kompensatsiyey garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka nagruzki.[Static non-active power compensator with full compensation of the harmonic components of the load current] Elektrotehnika, №2, 2003. s. 24-27.
10. Dmitriev B.F., Ratnikov I.V., Likhomanov A.M., Rozov A.Yu. Analiz i sintez garmonicheskogo sostava vykhodnogo napryazheniya regulyatorov peremennogo toka v avtonomnykh sistemakh elektropitaniya s impul'snoy nagruzkoy [Analysis and synthesis of the harmonic composition of the output voltage of AC regulators in autonomous power supply systems with a pulsed load] // Morskoy Vestnik, Spets. vypusk №1(9), 2012. s. 78-81.
11. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Kalmykov A.N., Egorova A.D. Sredstva povysheniya kachestva elektricheskoy energii v SEES. [Means for improving the quality of electric energy in Marine Power Systems] Morskoy Vestnik, №3(75), 2020. s. 77-80.
12. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Kalmykov A.N., Balitskaya K.V. Obosnovanie i vybor invertora napryazheniya pri realizatsii odnofaznykh istochnikov bespereboynogo pitaniya dlya sredstv sudovoy avtomatiki, [Justification and selection of a voltage inverter in the implementation of single-phase uninterruptible power supplies for ship automation] IV Nauchnyy forum telekommunikatsii: Teoriya i tekhnologii TTT-2020. «Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov FITPVP-2020»: Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, g. Samara, 2020. – 269-270 s.
13. Kolpakov A.N. Skhemotekhnika moshchnykh vysokovol'tnykh preobrazovateley. [Circuit design of high-power high-voltage converters] Silovaya elektronika, №2, 2007.
14. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Kornev A.S., Balitskaya K.V. Ustroystvo kompensatsii neaktivnoy moshchnosti v preobrazovatelyakh chastoty v sostave elektroenergeticheskikh sistem morskikh transportnykh sredstv. [Inactive Power Compensation Device in Frequency Converters of Marine Power Systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021g, №4, tom 2. Str.118-123.
15. Kochkin V.N., Nechaev O.P. Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatii. [Application of static reactive power compensators in electrical networks of power systems and enterprises] M.: Izd-vo NTs ENAS, 2002. 248 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Федорович Дмитриев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Сергей Яковлевич Галушин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gs@smtu.ru

Boris F. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Sergey Ya. Galushin, Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: gs@smtu.ru

Ираида Александровна Федотова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: fedotovaia@hotmail.com

Ксения Владимировна Балицкая, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: baliksenia@ya.ru

Алексей Юрьевич Розов, кандидат технических наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rozov33@gmail.com

Iraida A. Fedotova, Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Department of Machine Parts and Hoisting and Transport Mechanisms, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: fedotovaia@hotmail.com

Ksenya V. Balytskaya, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: baliksenia@ya.ru

Alexei J. Rozov, Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Department of Ship Automation and Measurements, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: rozov33@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.08.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.08.2022.

Научная статья

УДК 629.5.00

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.028>

К вопросу о формировании трибодиагностических моделей судовых ВОД в эксплуатации

В.В. Герасиди¹gerasidi@rambler.ru, А.В.Лисаченко¹ alexx.liss@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

Аннотация В работе выполнен анализ примера неисправности высокооборотного двигателя фирмы "Катерпиллар" C32 ACERT, установленного в качестве одного из главных двигателей морского буксира. Нарботка двигателя составляет 18000 часов. Выявлен дефект распределительного вала двигателя, вследствие чего судно было выведено из эксплуатации. Анализ требований завода изготовителя и классификационного общества РМРС предъявляемых к главным высокооборотным двигателям показывает, что безразборный трибологический метод контроля является неотъемлемой частью на всех стадиях технической эксплуатации двигателя. Результаты исследования влияния количественных и качественных характеристик по составу и концентрации в продуктах износа, окисления и загрязнения сторонними веществами масла показывают, что главными маркерами развития и характера дефектов элементов двигателя являются продукты износа их нормируемые значения и скорость нарастания в процессе эксплуатации. Контроль количественных и качественных параметров моторного масла являются одним из необходимых видов, применяемых для продления межремонтного интервала ВОД в процессе эксплуатации. Проводимые исследования судовых энергетических установок на основе применения безразборных методов диагностики морских судов в эксплуатации, лежат в основе системы управления автономных судов.

Ключевые слова: высокооборотный двигатель, анализ, моторное масло, индикаторы износа, техническое состояние, межремонтный интервал, трибодиагностика, продукты износа, дефект.

Благодарности: авторы выражают благодарность представителям фирмы "Катерпиллар" на Азово-Черноморском побережье за предоставление данных.

Для цитирования Герасиди В.В., Лисаченко А.В. К вопросу о формировании трибодиагностических моделей судовых ВОД в эксплуатации, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 93—98.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.028>

On the issue of the formation of tribodiagnostic models of ship WATERS in operation

Viktor V. Gerasidi¹gerasidi@rambler.ru, Aleksey V. Lisachenko¹ alexx.liss@yandex.ru

¹ Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes an example of a malfunction of the Caterpillar C32 ACERT high-speed engine installed as one of the main engines of a sea tug. The operating time of the engine is 18,000 hours. A defect in the engine camshaft was detected, as a result of which the vessel was decommissioned. Analysis of the requirements of the manufacturer and the RMRS classification society for the main high-speed engines shows that the non-selective tribological control method is an integral part at all stages of the technical operation of the engine. The results of the study of the influence of quantitative and qualitative characteristics in terms of composition and concentration in the products of wear, oxidation and contamination by third-party substances of oil show that the main markers of the development and nature of defects in engine components are wear products, their normalized values and the rate of increase during operation. Control of quantitative and qualitative parameters of engine oil is one of the necessary types used to extend the repair interval of WATER during operation. 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: high-speed engine, analysis, engine oil, wear indicators, technical condition, repair interval, tribodiagnostics, wear products, defect.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the representatives of Caterpillar on the Azov-Black Sea coast for providing the data.

For citation: Viktor V. Gerasidi, Aleksey V. Lisachenko, On the issue of the formation of tribodiagnostic models of ship WATERS in operation Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 93—98.

Введение

В настоящее время высокооборотные двигатели (ВОД) устанавливаются в промышленности и на судах крупнотоннажного и вспомогательного флота в качестве вспомогательных и главных элементов

пропульсивного комплекса, работающих на различных видах топлива (рисунок 1).

Тип двигателя	Отрасль	По роду топлива	Назначение
ВОД 4-х тактные	Морские Буксиры, ледовики, буксиропанши, торговые суда, платформы, суда обеспечения	Дизельные	Главные двигатели
		Газовые	Вспомогательные двигатели
	Промышленные Тепло-электростанции, газотурбинные станции, буровые станции, береговые сооружения, железнодорожный транспорт	Дизельные	Генерационные установки
		Газовые	Когенерационные установки Тригенерационные установки

Рис. 1. Применение четырехтактных двигателей на объектах морской и промышленной отрасли

В процессе технической эксплуатации в период межремонтного интервала возникают такие дефекты как, износы, повреждения и неисправности ответственных узлов и деталей ВОД [1-9]. Так,



Рис. 2. Дефекты деталей ВОД фирмы "Катерпиллар" ACERT
а) распределительный вал; б) коленчатый вал; в) вкладыши коренной шейки коленчатого вала

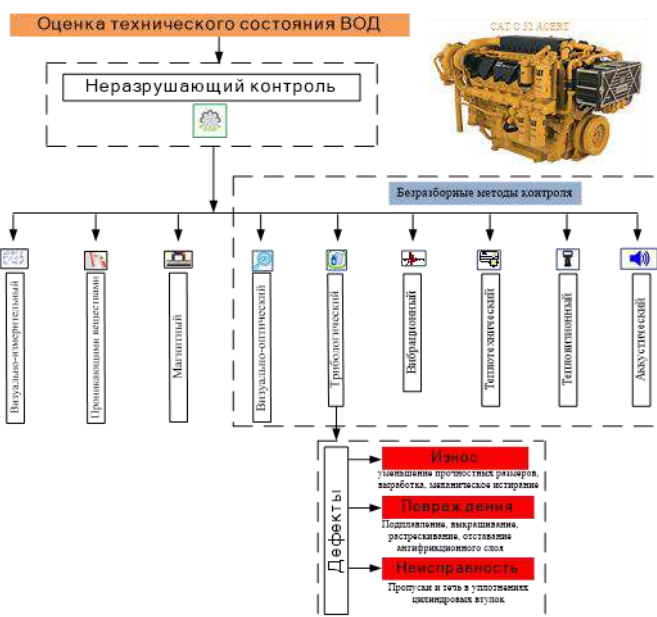


Рис. 3. Виды и методы неразрушающего контроля и их токены

Одним из немаловажных видов и методов контроля выявления и развития дефектов деталей ВОД в процессе эксплуатации является трибодиагностика. В триботехнической диагностике выполняется анализ состояния моторного масла по составу и концентрации продуктов износа, окисления и загрязнения сторонними веществами. Анализ масла системы смазки двигателя позволяет определить концентрацию в нем того или иного химического элемента, а также определить усредненный износ соответствующей детали при межремонтном интервале и скорректировать объем ремонтной ведомости во время ремонта по состоянию или очередного освидетельствования судовых ВОД.

например, при разборке одного из главных ВОД фирмы "Катерпиллар" С32 ACERT морского буксира при наработке 18 тыс. часов, работающего на дизельном топливе был обнаружен дефект распределительного вала (рисунок 2). Опыт эксплуатации главных ВОД фирмы "Катерпиллар" серии CAT С 32 мощностью от 746 кВт до 1700 кВт показывает, что после 12 тыс. часов наработки существуют проблемы связанные с дефектами элементов, которые приводят к увеличению эксплуатационных затрат двигателя и судна в целом.

В настоящее время для оценки технического состояния судовых ВОД и его элементов в процессе эксплуатации существуют методы и виды неразрушающего контроля [11], включая безразборные (рисунок 3).

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является судовой ВОД фирмы "Катерпиллар" С32 ACERT номинальной мощностью 746 кВт, работающий на дизельном топливе в эксплуатационном интервале от 12000 часов до 18000 часов наработки, установленного в качестве главного двигателя на морском судне.

Предметом исследования является влияние количественных и качественных характеристик по составу и концентрации в продуктах износа, окисления и загрязнения сторонними веществами масла на развитие дефектов элементов двигателя.

Целью статьи является создание трибодиагностических моделей для оценки

технического состояния в межремонтный интервал и ремонта по состоянию судовых современных ВОД.



























В таблице 1 представлены требования РМРС и завода-изготовителя, предъявляемые в процессе технической эксплуатации судовых ВОД. Из таблицы 1 видно, что безразборный трибологический метод контроля является неотъемлемой частью на всех стадиях технической эксплуатации двигателя.

1. Методика исследования

В таблице 2 представлены качественные параметры с указанием способов испытания, такие как, элементный анализ, состояние масла и присадки входящие в состав моторного масла.

Таблица 1

Предъявляемые требования и методы контроля судовых ВОД в процессе эксплуатации в соответствии [1-3]

№	Дефекты	Требования и рекомендации		Методы контроля
		PMPC	CAT	
Межремонтный интервал и ежегодное освидетельствование				
1	Повышенная вибрация двигателя	✓		
2	Нехарактерные удары, стуки и шумы	✓		
3	Неравномерное распределение нагрузки по цилиндрам	✓		
4	Повышенный нагрев подшипников	✓		
5	Повышенные температуры масла	✓		
6	Повышенные температуры охлаждающей воды	✓		
7	Повышенные температуры отработавших газов	✓		
8	Прорыв газов в картеры двигателей	✓		
9	Неисправности маневровых, пусковых устройств, регуляторов частоты вращения, предельных выключателей	✓		 
10	Неисправности топливной аппаратуры	✓		 
11	Неисправности предохранительных клапанов	✓		
12	Неисправности вспомогательных механизмов, обслуживающих двигатели и приводимых от двигателей	✓		 
13	Неисправности контрольно-измерительных приборов	✓		 
Ремонт по состоянию и очередное освидетельствование				
1	Остов двигателя	✓		
	Впускной и выпускной коллектор, втулки цилиндров, крышки цилиндров, блок цилиндров, поддон.			
2	Детали движения	✓		
	Поршни, поршневые кольца компрессионные "верхние, средние", поршневые кольца маслосъемные "нижние", стопорные кольца поршневых пальцев, коренные подшипники, головные и шатунные подшипники, коренные и шатунные шейки, болты коренных подшипников, форсунки юбки поршня (масляные форсунки), шкив, тело шатунов, район разъема, крышки "нижних" подшипников шатунов и болты крышек			 
3	Механизм газораспределения	✓		 
	Впускные и выпускные клапана, направляющие, "Ротокапы", пружины, уплотнения масляные, седла, замки ("сухари") впускных и выпускных клапанов, болты крепления крышки цилиндра (короткие и длинные), вал, пружина и коромысла привода клапанов, ("лифтеры") толкатели впускных и выпускных клапанов, распределительный вал, шестерни распределительные привода навесных механизмов, турбокомпрессор			
4	Система охлаждения	✓		
	Насос забортной воды и охлаждающей жидкости, термостат, охладитель наддувочного воздуха, гибкие шланги и шланги под давлением, патрубков системы охлаждающей жидкости			 
5	Система смазки и топливная система	✓		
	Масляный насос, охладитель масла, ТНВД, топливные форсунки, трубопровод подачи топлива форсунок.			 

Примечание.

Блок цилиндров, крышка цилиндров, шатун, поршень, поршневой палец, коленчатый вал подлежат при ремонте обязательному контролю на отсутствие трещин (дефектоскопия)

Из таблицы 2 видно, что часть параметров моторного масла характеризуют общее состояние масла (старение), продуктов износа и присадок отвечающие за качество самого масла и его смазывающих свойств. Однако, на дефекты деталей двигателя влияют продукты износа, которые состоят из отдельных элементов представленные на рисунке 3.

2. Результаты исследования

Во время экспериментального исследования были проанализированы элементы, содержащиеся в моторном масле, которые влияют на износ деталей двигателя фирмы "Катерпиллар" C32 ACERT при наработке от 12 до 18 тыс. часов. Анализ моторного масла выполнялся в интервале 1000 часов специализированной лабораторией признанной заводом изготовителем (таблица 3).

Таблица 2

Трибодиагностические качественные параметры масла		
№	Дефекты деталей ВОД	Элементы
<i>Элементный анализ, способ испытания (ASTM D5185)</i>		
1	Износ втулки цилиндров	Железо (Fe),
2	Износ поршневые кольца	Хром (Cr),
3	Износ алюминиевой юбки поршня	Алюминий (AL)
4	Износ нижнего штока и главных подшипников	Свинец (Pb), (AL), (Cr)
5	Абразивными износ частицами сажи	Сажа (ST)
6	Коррозионный износ и ржавление	Вода (W)
7	Грязь	Кремния (Si) > (Al), (Fe), Свинец (Pb)
<i>Состояние масла, способ испытания (ASTM E2412, ASTM D445, ASTM D3524, ASTM D7922 ISO11171:1999 указано в соответствии с ISO 4406, ASTM D664, NASTM 2896, ASTM D1744)</i>		
8	Износ металлических компонентов	Общее кислотное число (TAN)
9	Предотвращает коррозию	Общее базовое число (TBN)
10	Снижается качества смазки	Вода (метод Карла Фишера)
11	Загрязнение охлаждающей жидкостью	Натрий (Na), калий (K), медь (Cu)
12	Снижается качества смазки	Вязкость (V100)
13	Полировка и залипания деталей	Окисление (OXI)
14	Коррозия	Сульфатированная сера (SUL)
15	Снижается качества смазки	Нитрование (NIT)
16	Уменьшает вязкость масла	Топливо (F)
<i>Присадки, способ испытания (ASTM D5185)</i>		
17. Магний (Mg), 18. Барий (Ba), 19. Кадмий (Cd), 20. Кальций (Ca), 21. Фосфор (P), 22. Цинк (Zn), 23. Молибден (Mo), 24. Бор (B)		

Таблица 3

Качественные и количественные характеристики и нормируемые показатели моторного масла CAT DEO 15W40 фирмы CAT судового ВОД фирмы "Катерпиллар" модели C32 ACERT

№	Элементы	Наработка, тыс. час.						Примечание
		13	14	15	16	17	18	
1	Cu, г/т	2	2	3	6	8	12	
2	Fe, г/т	4	6	14	24	87	284	Максимальная скорость износа составляет около 197 г/т
3	Cr, г/т	0	0	0	1	1	4	
4	Al, г/т	0	1	1	1	3	4	
5	Pb, г/т	0	0	0	0	1	2	
6	Si, г/т	3	4	7	8	9	16	Максимальная скорость износа составляет около 7 г/т
7	Ni, г/т	0	0	0	0	0	1	
8	Cn, г/т	0	0	0	0	0	1	

Качественные и количественные параметры продуктов износа

- Cn**: Износ подшипников (до 5 тыс. часов)
- Cr**: Износ поршневых колец (до 5 тыс. часов)
- AL**: Износ алюминиевой юбки поршней (до 10 тыс. часов)
- Pb**: Износ нижней части штока, подшипников (до 10 тыс. часов)
- Si**: Износ поршневых колец (до 10 тыс. часов)
- Ni**: Износ поршневых колец (до 15 тыс. часов)
- Fe**: Износ поршневых колец, втулок цилиндров (до 50 тыс. часов)
- Cu**: Износ головного подшипника поршней, элементов системы охлаждения (до 50 тыс. часов)

Анализ моторного масла показывает, что содержание:

– железа (Fe) при 17000 часов наработки превысило максимальные значения в соответствии норм завода изготовителя и РМРС и составляет 87 г/т, и в течение 1000 часов увеличилось втрое (максимальная скорость износа составляет около 197 г/т).

– кремния (Cr) при 17000 часов наработки превысило максимальные значения, в соответствии норм завода изготовителя и РМРС и составляет 16 г/т (максимальная скорость износа составляет около 7 г/т).

– остальные элементы не превышают максимальных значений в соответствии [10,12].

На рисунке 3 представлен распределительный вал судового ВОД фирмы "Катерпиллар" C32 ACERT после разборки при наработке 18 тыс. часов. Из рисунка 4 видно, что при вскрытии исследуемого двигателя был зафиксирован дефект, а именно, выкрашивание шейки распределительного вала. Таким образом, превышение нормируемых значений важных элементов и их резкое увеличение продуктах износа в моторном масле является индикатором развития дефектов деталей ВОД.



Рис. 4. Износ распределительного вала судового ВОД фирмы "Катерпиллар" C32 ACERT наработка 18 тыс. часов

Заключение

Представленные результаты данной статьи показывают о необходимости применять и внедрять в диагностические комплексы судовых дизелей трибодиагностические методы анализа моторного масла для оценки технического состояния судовых ВОД в эксплуатации. Количественные и качественные параметры моторного масла являются трибодиагностическими индикаторами (маркерами) износа деталей на основе безразборного метода контроля и являются одним из необходимых видов, применяемых для продления межремонтного интервала ВОД в процессе эксплуатации. Как показывают выполненные исследования, важными трибодиагностическими маркерами, которые влияют на зарождение дефектов деталей двигателя, являются увеличенные значения элементов Fe и Cr в продуктах износа моторного масла.

Литература

1. Olexiy Balitskii, Valerii Kolesnikov. Identification of Wear Products in the Automotive Tribotechnical System Using Computer Vision Methods, Artificial Intelligence and Big Data. 2019 XIth International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). DOI:10.1109/ELIT.2019.8892275
2. M. S. Tunalioglu and B. Tuç, Theoretical and experimental investigation of wear in internal gears, *Wear*, vol. 309, no. 1-2, pp. 208–215, 2014.
3. K. F. Brethee, D. Zhen, F. Gu, and A. D. Ball, Helical gear wear monitoring: modelling and experimental validation, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 117, pp. 210–229, 2017.
4. I. El-Thalji and E. Jantunen, Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings, *Tribology International*, vol. 84, pp. 90–99, 2015.
5. J. Sep, L. Tomczewski, L. Galda, and A. Dzierwa, The study on abrasive wear of grooved journal bearings, *Wear*, vol. 376-377, pp. 54–62, 2017.
6. F. Lyu, J. Zhang, G. Sun et al., Research on wear prediction of piston/cylinder pair in axial piston pumps, *Wear*, vol. 456-457, pp. 456-457, 2020.
7. B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández et al., Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: experimental study and modelling, *Tribology International*, vol. 106, pp. 23–33, 2017.
8. L. Liu, C. Yang, and Y. Sheng, Wear model based on real-time surface roughness and its effect on lubrication regimes, *Tribology International*, vol. 126, pp. 16–20, 2018.
9. Saad M. S. Mukras. Computer Simulation/Prediction of Wear in Mechanical Components. *Tribological Behavior of Mild Steel under Canola Biolubricant Conditions*. <https://doi.org/10.1155/2020/8867351>.
10. Caterpillar. Services. Listen to the lifeblood of your machine. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mantracgroup.com/media/orufujvl/s-o-s_lifeblood.pdf.
11. ГОСТ Р 56542-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Non-destructive testing. Classification of types and method. Москва. Стандартинформ. 2019.
12. Российский морской регистр судоходства. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. НД № 2-020101-012. Санкт-Петербург, 2022

References

1. Olexiy Balitskii, Valerii Kolesnikov. Identification of Wear Products in the Automotive Tribotechnical System Using Computer Vision Methods, Artificial Intelligence and Big Data. 2019 XIth International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). DOI:10.1109/ELIT.2019.8892275
2. M. S. Tunalioglu and B. Tuç, Theoretical and experimental investigation of wear in internal gears, *Wear*, vol. 309, no. 1-2, pp. 208–215, 2014.
3. K. F. Brethee, D. Zhen, F. Gu, and A. D. Ball, Helical gear wear monitoring: modelling and experimental validation, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 117, pp. 210–229, 2017.
4. I. El-Thalji and E. Jantunen, Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings, *Tribology International*, vol. 84, pp. 90–99, 2015.
5. J. Sep, L. Tomczewski, L. Galda, and A. Dzierwa, The study on abrasive wear of grooved journal bearings, *Wear*, vol. 376-377, pp. 54–62, 2017.
6. F. Lyu, J. Zhang, G. Sun et al., Research on wear prediction of piston/cylinder pair in axial piston pumps, *Wear*, vol. 456-457, pp. 456-457, 2020.
7. B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández et al., Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: experimental study and modelling, *Tribology International*, vol. 106, pp. 23–33, 2017.
8. L. Liu, C. Yang, and Y. Sheng, Wear model based on real-time surface roughness and its effect on lubrication regimes, *Tribology International*, vol. 126, pp. 16–20, 2018.
9. Saad M. S. Mukras. Computer Simulation/Prediction of Wear in Mechanical Components. Tribological Behavior of Mild Steel under Canola Biolubricant Conditions. <https://doi.org/10.1155/2020/8867351>.
10. Caterpillar. Services. Listen to the lifeblood of your machine. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: https://www.mantracgroup.com/media/orufujvl/s-o-s_lifblood.pdf.
11. GOST R 56542-2019. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Kontrol' Nerazrushayushchiy kontrol. Klassifikatsiya vidov i metodov. Non-destructive testing. Classification of types and method. Moskva. Standartinform. 2019.
12. RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING. RULES FOR THE CLASSIFICATION SURVEYS OF SHIPS IN SERVICE. ND No. 2-020101-012-E. St. Petersburg, 2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Васильевич Герасиди, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, проспект 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

Алексей Витальевич Лисаченко, аспирант кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, проспект 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 62-822

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.029>

Экспериментальное исследование особенностей гидродинамики судового устройства для распыления сорбента

О.А. Городников¹ gorodnikov.o@vvsu.ru, А.Е. Аввакумов¹ Andrei2000ava@yandex.ru,
В.В. Шутов¹ vasily.vl.20000@gmail.com

¹Владивостокский государственный университет

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментов по определению возможности движения подводного аппарата, разработанного для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Данный аппарат является элементом судовой энергетической установки, которая может быть использована на судах, в независимости от их назначения и размеров. Данная установка была спроектирована с целью уменьшения времени локализации и ликвидации разливов и утечек нефти и нефтепродуктов, как при возможности работать в стандартных условиях, так и для работы в битом и сплошном льду. После создания модели и проведения математических расчетов с приложением нагрузок, были выведены несколько наиболее эффективных траекторий движения и распыления сорбентов. Потребовалось проведение экспериментов для наиболее точных результатов перед установкой и проведением испытаний на судне. Ряд экспериментов и полученные результаты, изложенные в статье, позволили определить наиболее эффективную траекторию и нагрузки при использовании данной системы.

Ключевые слова: нефтяное пятно, подводный аппарат, насос, судовая энергетическая установка, сорбент, гидравлический движитель, траектория движения.

Для цитирования: Городников О.А., Аввакумов А.Е., Шутов В.В. Экспериментальное исследование особенностей гидродинамики судового устройства для распыления сорбента, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 99—105.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.029>

Experimental study of the hydrodynamics features of a shipboard sorbent spraying device

Oleg A. Gorodnikov¹ gorodnikov.o@vvsu.ru, Andrei E. Avvakumov¹ Andrei2000ava@yandex.ru,
Vasily V. Shutov¹ vasily.vl.20000@gmail.com

¹Vladivostok State University (VVSU)

Abstract. The article presents the results of experiments on determining the motion capability of an underwater vehicle designed for oil and petroleum product spill elimination. This apparatus is an element of a ship power plant, which can be used on ships, regardless of their purpose and size. This unit was designed to reduce the time of localization and elimination of spills and leaks of oil and petroleum products, either possible to work in standard conditions or work in the cracked and solid ice. After creating the model and carrying out mathematical calculations with application of loads, several most effective trajectories of movement and spraying sorbent were deduced. Experiments for the most accurate results were required before installation and testing on the ship. A number of experiments and the results obtained, outlined in the article, made it possible to determine the most effective trajectory and loads when using this system.

Keywords: oil spill, underwater vehicle, pump, ship power plant, sorbent, hydraulic propulsor, trajectory.

For citation: Oleg A. Gorodnikov, Andrei E. Avvakumov, Vasily V. Shutov. Experimental study of the hydrodynamics features of a shipboard sorbent spraying device. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 99—105.

Введение

Разливы нефти и нефтепродуктов в акваториях происходят как при добыче нефти, транспортировке нефти и нефтепродуктов, так и при утечках топлива с судов. Существует несколько способов ликвидации пятна на поверхности воды. Если рассматривать сложные условия, битый или сплошной лед, то чаще всего существующие способы, либо не подходят, либо являются малоэффективными. При этом не стоит забывать, что оборудование для локализации и сбора необходимо доставить к месту аварии, а это зачастую занимает много времени или вовсе является невозможным [1]. Целью работы является определение наиболее эффективной траектории движения нового подводного устройства.

Актуальность данной работы заключается во внедрении нового технического устройства для ликвидации аварийных разливов нефти, которое позволит в кратчайшие сроки локализовать и ликвидировать нефтяное пятно, что является приоритетной задачей для всех компаний нефтяной отрасли.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать новую судовую установку, основным элементом которой является подводный аппарат для нанесения сорбента в толще воды. Им можно управлять и регулировать подачу сорбента с борта судна (рис. 1, а, б).

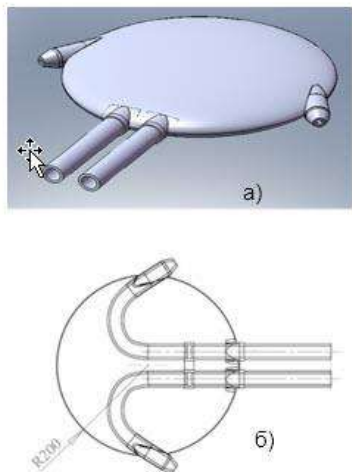


Рис. 1. Модель подводного аппарата для распыления сорбента

Связующим звеном между аппаратом и судном (стационарным объектом) служит гибкий шланг. Особенностью данного устройства является то, что почти не требуется установка дополнительного оборудования. Аппарат сможет отдаляться от судна на расстояние от 100 до 150 метров. Элементами комплекса являются подводное судовое устройство, пожарный насос и паровой судовый котел на судне. Подводное судовое устройство имеет «чечевичную» форму корпуса, что позволит обеспечить минимальное сопротивление в толще воды при его движении.

При сравнении эквивалентных сопротивлений гибкого трубопровода и самого аппарата, получены значения, позволяющие определить движение маятникового типа. Такое движение для данной системы возможно при расположении сопел под углом 90° , а для обеспечения движения возвратно-поступательного типа угол расположения сопел варьируется в пределах от 15° до 45° . Отсюда делаем вывод, что в зависимости от поставленной задачи и условий применения аппарата, возможно осуществлять его движение в толще воды как возвратно-поступательное движение вдоль оси трубопровода (рис. 2, б), так и движение маятникового типа (рис. 2, а).

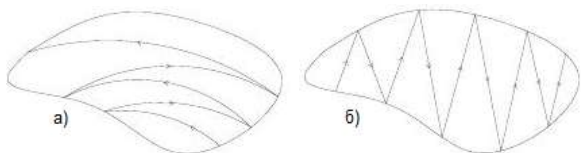


Рис. 2. Траектории движения подводного аппарата

При обработке результатов и сравнении значений возникли разногласия по определению оптимального движения подводного аппарата судового энергетической установки. Было принято решение провести эксперимент и реальные испытания для подтверждения или опровержения результата расчетов [2].

Принцип работы подводного аппарата

Работа подводного судового устройства осуществляется следующим образом: к

распылителю от пожарного насоса, совместно с паром для поддержания необходимой температуры подаваемой воды, находящегося на борту судна по гибкому трубопроводу, подключенному к соединительному устройству, под давлением подается вода. Далее по соединенному с ним трубопроводу вода поступает к управляющей аппаратуре.

Управляющая арматура направляет воду к правому, левому или обоим сопловым аппаратам сразу. В результате подачи струи воды на устройство будет действовать реактивная тяга и распылитель начнет перемещаться. При подаче одновременно к правому и левому сопловым аппаратам распылитель получает поступательное движение и удаляется от места спуска под лед на необходимое расстояние, вытягивая шланг на заданную длину.

При подаче воды в правый сопловой аппарат, реактивная тяга водяной струи будет смещать распылитель влево. При подаче воды в левый сопловой аппарат, реактивная тяга водяной струи будет смещать распылитель в противоположную сторону. Все элементы устройства находятся в защитном корпусе.

При подходе распылителя в нужное место по гибкому трубопроводу производится подача сорбента в виде пульпы, путем включения в поток воды твердого сорбента (например, терморасщепленного графитного сорбента).

После подхода распылителя к нефтяному пятну происходит его перемещение под действием реактивной тяги от движения пульпы и одновременная подача в загрязненную воду сорбента. Впрыснутый в воду на необходимой глубине сорбент всплывает и по пути своего движения сорбирует капли нефтепродукта, находящиеся в толще воды. Применение водометного движителя для распыления будет способствовать качественному и равномерному перемешиванию сорбента в толще воды.

Методика проведения эксперимента

При проведении эксперимента потребовалось воссоздать условия максимально приближенные к реальному использованию подводного устройства. Для этого необходимо было использовать насос, позволяющий создать напор, равный требуемому напорю пожарного насоса на судне. В качестве аналога использовался пожарный центробежный насос марки НЦПН-50/100 (NP-3000) на базе пожарного автомобиля КАМАЗ АЦ-5, 0-40 (5350), производительностью 40 л/с и номинальным напором 100 метров. Пожарный насос подключен к распределительному управляющему устройству, на котором находятся краны управления подачи напора в каждое из сопел. Путем открытия и закрытия шаровых кранов, можно регулировать движение подводного устройства, как по заданному радиусу, так и его прямой ход при включении обеих сопел [3].

Для проведения эксперимента на территории яхт-клуба Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, на пирсе был установлен мобильный резервуар каркасный РК-10 объемом 10 м^3 , диаметром 3,4 м. и высотой 1,3 м. На рис. 3 представлена схема резервуара.

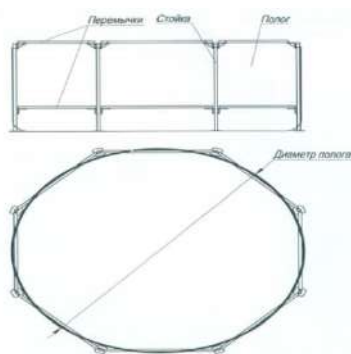


Рис. 3. Схема каркасного резервуара

Затем его наполнили пресной водой для возможности погружения в него подводного устройства и проведения ряда экспериментов с целью определения основных показателей и сопротивлений, возникающих в процессе эксплуатации модели, а также проверки теоретических данных, полученных в результате расчетов на действующей модели [4].

Мобильный резервуар каркасный монтируется на местности в течение 20 минут и заполняется водой при помощи пожарного насоса. Так же была предусмотрена циркуляция воды, во избежание утечек жидкости при проведении эксперимента [8].

Температура используемой для проведения эксперимента воды 18 °С, определение температуры воды производилось электронным термометром.

После наполнения емкости водой и измерения её температуры, на стенках резервуара, при помощи карабинов, были установлены электронные динамометры, которые прикреплены к металлическим стойкам корпуса резервуара карабинами. Чувствительный элемент для определения усилий, создаваемых устройством при движении, был зафиксирован металлической проволокой. В зависимости от включаемых сопел и подаваемого давления, показания динамометра фиксировались и записывались в протокол эксперимента.

Для измерения создаваемого усилия были использованы электронные динамометры фирмы Cintar-Portal Electronik Scale, фиксирующие показания с точностью до тысячных долей.

Все испытания повторялись несколько раз, что позволило получить более точную информацию и провести анализ полученных результатов.

Периодически динамометры меняли местами для получения более точных результатов экспериментов и уменьшения возможности возникновения погрешностей.

Подводное устройство для подачи сорбирующего вещества было подключено к распределительному устройству и погружено в резервуар с пресной водой (рис.4). Так же на начальной стадии испытаний подводное устройство фиксировалось поплавками для определения плавучести и необходимого балласта. Все движения аппарата и количество подаваемой жидкости вносились в протокол эксперимента.

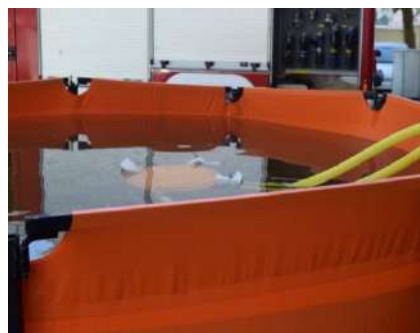


Рис.4. Общий вид подводного устройства при погружении в каркасный резервуар

Для определения расхода использовалась мерная емкость объемом 25 литров, для определения временных промежутков использовались два электронных секундомера ИНТЕГРАЛ-С-01.

Экспериментальное определение тяги и скорости движения подводного аппарата

Проведение эксперимента было разделено на несколько этапов, каждый из которых проводился с целью определения расходно-напорной характеристики аппарата, создаваемого тягового усилия, скорости движения и его поведения в заданных параметрах.

Первый этап заключался в определении расходно-напорной характеристики, создаваемой подводным устройством.

Шланги аппарата подключили к распределительному устройству управления, находящемуся вне бассейна, так как при использовании его на судне распределительное устройство будет находиться на палубе. Затем производилась подача воды под разным напором, создаваемым мобильным пожарным насосом на базе пожарного автомобиля [9].

Вода в систему подавалась под различными давлениями 0,2 МПа, 0,3 МПа и 0,5 МПа. Манометр для измерения создаваемого напора был подключен к системе для фиксации результатов [10].

Вода из емкости подавалась в распределительное устройство, которое в свою очередь регулирует подачу напора воды в одно из сопел или в оба одновременно. При этом поток воды, проходя через сопла, создавал движительную силу,двигающую подводное устройство в толще воды. Подводное устройство, двигаясь, натягивало проволоку и создавало усилие, фиксируемое динамометром.

Подача воды осуществлялась поочередно в правое и левое сопло, затем в оба одновременно, с давлением 0,2 МПа, 0,3 МПа и 0,5 МПа. При этом вода, подаваемая через сопло, наполняла мерную емкость объемом $25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Емкость взвешивалась электронным динамометром, результат фиксировался. Процедура повторялась пять раз, для получения более точных результатов, в сумме было проведено 15 измерений для каждого этапа эксперимента [5]. Усредненные результаты первого этапа эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1
Измерения напорно-расходных характеристик

Подача	Давление, Мпа	Время, с	Объем воды, ·10 ⁻³ м ³
Левое сопло	0,2	3	4,2
	0,3	4	5,8
	0,5	5	7,8
Правое сопло	0,2	3	4,2
	0,3	4	5,8
	0,5	5	7,8
Оба сопла	0,2	3	5,6
	0,3	4	7,6
	0,5	5	10,4

Принципиальная схема данной установки представлена на рис. 5.

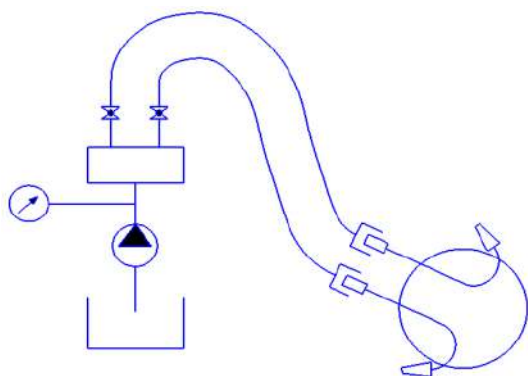


Рис. 5. Принципиальная схема установки

Второй этап эксперимента проводился с целью определения усилий, создаваемых подводным устройством [6]. Принципиальная схема с указанием основных элементов изображена на рис. 6.

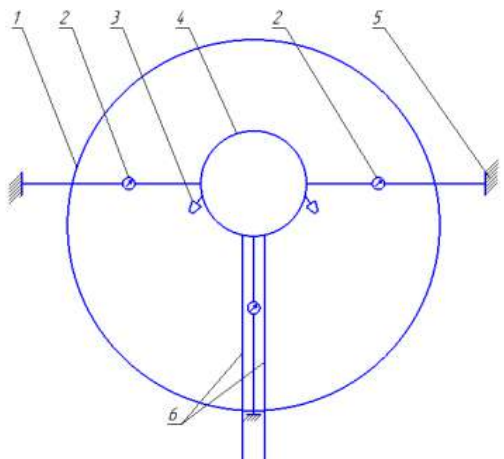


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментальной установки с указанием основных элементов конструкции

Подводное устройство (4), помещается в бассейн (1). Фиксация подводного устройства производится к стенкам бассейна (5). В свою очередь фиксаторы подводного устройства подключены к электронным динамометрам (2). Вода через сопла (3) подается под давлением в левое и правое сопло, затем в оба одновременно. В таблице 2 приведены усредненные значения создаваемых усилий.

Таблица 2
Измерения создаваемого усилия на сопла при изменении напора

Подача	Давление, Мпа	Создаваемое усилие, кг
Левое сопло	0,2	1,795
	0,3	2,302
	0,5	3,395
Правое сопло	0,2	1,799
	0,3	2,297
	0,5	3,398
Оба сопла	0,2	1,247
	0,3	3,397
	0,5	4,985

Третий этап эксперимента позволил определить изменение усилия, создаваемые подводным аппаратом на динамометры, которые подключены вдоль оси сопел (рис.7).

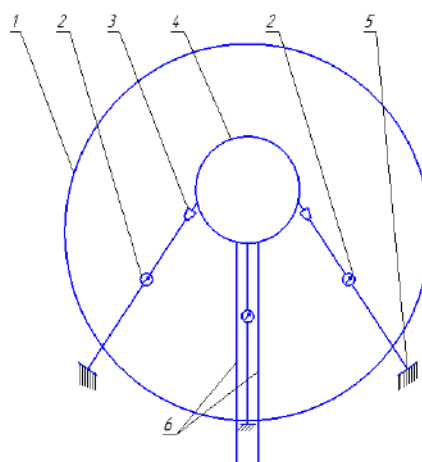


Рис. 7. Принципиальная схема экспериментальной установки

Подводное устройство (4), погружается в бассейн (1). Аппарат фиксируется к корпусу бассейна (5), фиксация происходит вдоль оси сопел (3). Вода под давлением 0,2 МПа, 0,3 МПа и 0,5 МПа подается через шланг (6), в левое сопло при перекрытом правом, затем процедура проводится аналогично при открытом правом сопле и закрытом левом сопле, значения результатов фиксируются электрическими динамометрами (2). Усредненные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3
Измерения создаваемого усилия при расположении динамометров вдоль оси сопел

Подача	Давление, Мпа	Создаваемое усилие, кг
Левое сопло	0,2	1,798
	0,3	2,693
	0,5	5,700
Правое сопло	0,2	1,799
	0,3	2,700
	0,5	5,697

Четвертый этап проведения эксперимента - определение скорости движения подводного устройства. Подводное устройство было установлено в левый край бассейна, затем в левое сопло подали воду под давлением. Аппарат двигался

с одного конца бассейна в другой. Затем он устанавливался в правый край бассейна, и операция повторялась. После фиксации данных и замеров потраченного времени аппарат устанавливался в начальную точку бассейна, и в него подавалась вода в оба сопла под давлением. При подаче воды в оба сопла аппарат совершал движение вперед, данные фиксировались. Процедура повторялась пять раз подряд для получения более точных результатов. Исходя из размеров каркасного резервуара и скорости движения подводного устройства, фиксируемой электронным секундомером, получили скорость движения подводного устройства в толще воды. Усредненные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4
Скорость движения и расход аппарата в толще воды

Подача	Давление, Мпа	Скорость движения, м/с	Расход воды, л
Левое сопло	0,2	0,616	3,04
	0,3	0,736	5,06
	0,5	0,92	7,1
Правое сопло	0,2	0,616	3,1
	0,3	0,736	5,04
	0,5	0,92	7,06
Оба сопла	0,2	1,15	5,04
	0,3	1,42	9,02
	0,5	2,14	11,98

Принципиальная схема движения подводного устройства в толще воды в пределах бассейна изображена на рис. 8.

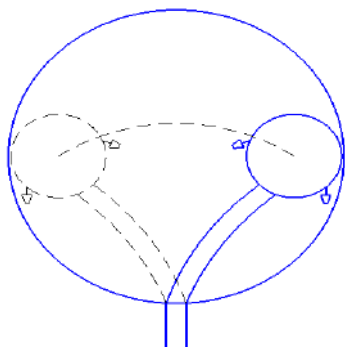


Рис. 8. Принципиальная схема движения подводного устройства

Результаты испытания на судне

Было принято решение о проведении данного типа испытаний на судне. Зная о результатах наглядных экспериментов на коротких шлангах в

условиях, приближенных к реальной ситуации, на судне использовался шланг длиной 100 метров с подключением смесителя для подачи сорбентов.

В процессе подготовки к проведению испытания учитывались возможности подводного устройства и его поведения в толще воды. Необходимо было выяснить, какое тяговое усилие создает подводное устройство при увеличении длины шланга до 100 метров. Какое усилие на каждое из сопел будет создаваться при подаче воды при определенном напоре, так и при включении обоих сопел одновременно, что позволило бы подтвердить расчеты.

Необходимо было экспериментально, для подтверждения расчетов, определить скорость движения подводного устройства при его полном включении, при подаче воды на одно из сопел и его глубину нахождения без движения (в состоянии покоя) [11].

В результате реального испытания на судне выяснилось, что при подаче напора на одно из сопел подводный аппарат будет совершать движение не маятниковое типа, а как бы «закручиваться» (рис. 9).

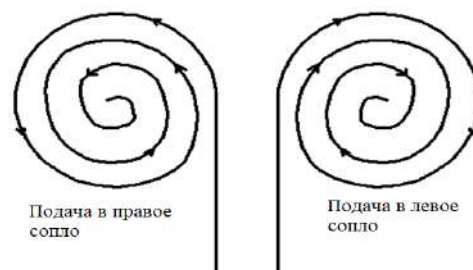


Рис. 9. Действительная траектория движения подводного аппарата

Заключение

В работе были рассмотрены предполагаемые возможности движения подводного аппарата, такие как: возвратно-поступательное и маятниковое. Во время проведения испытаний на судне была выявлена действительная, «закручивающаяся» траектория, которая не будет являться недостатком, а наоборот, будет преимуществом. При таком движении появляется возможность в кратчайшие сроки распылить сорбент по периметру нефтяного пятна, это остановит распространение пятна, то есть локализует его. Такая траектория будет эффективнее возвратно-поступательного движения, так как займёт меньше времени на распыление и не требует большого физического труда. При этом данная траектория нанесения сорбентов полностью отвечает требованиям и нормам нанесения сорбентов на нефтяное пятно.

Литература

1. Артемов А.В. Современные технологии очистки нефтяных загрязнений / А.В. Артемов // Нефть. Газ. Промышленность. -М.: Недра, 2008. - №2. - 340 с.
2. Патент на полезную модель № 144489 U1 Российская Федерация, МПК E02B 15/04, E02B 15/10. Устройство для подводного введения сорбента: № 2013147318/13: заявл. 09.01.2014: опублик. 20.08.2014 / О. А. Городников, С. Ю. Монинец, С. В. Петрашев.
3. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды: / А.М. Владимиров. –Л: Гидрометеиздат, 2007, 224 с.
4. Емельянов Н.Ф. Расчёт ходкости и гребного винта морского транспорта судна / Н.Ф. Емельянов, С.А. Огай. Владивосток, 1984, 65 с.

5. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников, С. В. Петрашев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 15-17.
6. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников, С. В. Петрашев // Актуальные вопросы науки. – 2016. – № 27. – С. 92-98.
7. Городников О. А. Способ распыления сорбентов при ликвидации аварийных разливов нефти с помощью подводного аппарата / О. А. Городников // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: сборник материалов III Международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Кемерово, 10–11 августа 2016 года. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью "Западно-Сибирский научный центр", 2016. – С. 115-117.
8. Городников О. А. Разработка подводного аппарата для нанесения сорбентов при ликвидации разливов нефти в замерзающих акваториях / О. А. Городников // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2016. – № Т11. – С. 2706-2710.
9. Городников О. А. Разработка подводного аппарата для нанесения сорбентов в замерзающих акваториях при ликвидации аварийных разливов нефти / О. А. Городников, С. В. Петрашев, П. С. Иушин // Приоритетные направления развития науки и технологий: Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции, Тула, 20 ноября 2015 года / Под общей редакцией В.М. Панарина. – Тула: Издательство "Инновационные технологии", 2015. – С. 96-100.
10. Другов Е.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов, 2007, 270 с.
11. Разработка экологически безопасных технологий для ликвидации разливов нефти в ледовых условиях, журнал «Гидротехника», Санкт - Петербург, издательство «Тандем», № 1 - апрель 2017г. - 95 с.

References

1. Artemov A.B. Sovremennye tekhnologii oчитki neftnyanykh zagryaznenii [Modern technologies of oil pollution treatment] / A.B. Artemov // Neft'. Gaz. Promyshlennost'. -M.: Nedra, 2008. - №2. - 340 s.
2. Patent na poleznuyu model' № 144489 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E02B 15/04, E02B 15/10. Ustroystvo dlya podvodnogo vvedeniya sorbenta [Underwater sorbent injection device] : № 2013147318/13 : zayavl. 09.01.2014 : opubl. 20.08.2014 / O. A. Gorodnikov, S. YU. Moninets, S. V. Petrashev.
3. Vladimirov A.M. Okhrana okruzhayushchei sredy [Environmental protection] : / A.M. Vladimirov. –L: Gidrometeoizdat, 2007, 224 s.
4. Emel'yanov N.F. Raschet khodkosti i grebnogo vinta morskogo transporta sudna [Calculation of the propulsion and propeller of the ship's marine transport] / N.F. Emel'yanov, S.A. Ogai. Vladivostok, 1984, 65 s.
5. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev // Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. – 2016. – № 3. – S. 15-17.
6. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev // Aktual'nye voprosy nauki. – 2016. – № 27. – S. 92-98.
7. Gorodnikov O. A. Sposob raspyleniya sorbentov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s pomoshch'yu podvodnogo apparata [Method of spraying sorbents during oil spill response using a submersible device] / O. A. Gorodnikov // Nauchno-tekhnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego : sbornik materialov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2-kh tomakh, Kemerovo, 10–11 avgusta 2016 goda. – Kemerovo: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Zapadno-Sibirskii nauchnyi tsentr", 2016. – S. 115-117.
8. Gorodnikov O. A. Razrabotka podvodnogo apparata dlya naneseniya sorbentov pri likvidatsii razlivov nefti v zamerzayushchikh akvatoriyakh [Development of an underwater vehicle for application of sorbents for oil spill response in freezing waters] / O. A. Gorodnikov // Nauchno-metodicheskii ehlektronnyi zhurnal Kontsept. – 2016. – № Т11. – S. 2706-2710.
9. Gorodnikov O. A. Razrabotka podvodnogo apparata dlya naneseniya sorbentov v zamerzayushchikh akvatoriyakh pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti [Development of an underwater vehicle for application of sorbents in freezing water areas during oil spill response] / O. A. Gorodnikov, S. V. Petrashev, P. S. Iushin // Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i tekhnologii : Tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Tula, 20 noyabrya 2015 goda / Pod obshchei redaktsiei V.M. Panarina. – Tula: Izdatel'stvo "Innovatsionnye tekhnologii", 2015. – S. 96-100.
10. Drugov E.S., Rodin A.A. Ehkologicheskie analizy pri razlivakh nefti i nefteproduktov [Environmental analyses for oil and petroleum product spills], 2007, 270 s.
11. Razrabotka ehkologicheski bezopasnykh tekhnologii dlya likvidatsii razlivov nefti v ledovykh usloviyakh [Development of environmentally safe technologies for oil spill response in ice conditions], zhurnal «Gidrotekhnika», Sankt - Peterburg, izdatel'stvo «Tandem», № 1 - aprel' 2017g. - 95 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Александрович Городников - старший преподаватель кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВВГУ»), Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: gorodnikov.o@vvsu.ru

Oleg A. Gorodnikov, senior lecturer of department of transport's processes and technologies, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: gorodnikov.o@vvsu.ru

Андрей Евгеньевич Аввакумов, магистрант кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВВГУ»), Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: Andrei2000ava@yandex.ru

Andrei E. Avvakumov, master's student of department of transport's processes and technologies, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: Andrei2000ava@yandex.ru

Василий Витальевич Шутов, магистрант кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВВГУ»), Российская Федерация, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: vasilij.vl.20000@gmail.com

Vasilij V. Shutov, master's student of department of transport's processes and technologies, Vladivostok State University (VVSU), Gogolya, 41 St. Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: vasilij.vl.20000@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.06:621.43.055

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.030>

Управление параметрами топливоподачи с целью снижение выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями

В.А. Туркин¹ turvla@mail.ru, Г.В. Игнатенко¹ ignatenko.georg@yandex.ru, В.В. Беляев¹ bv80@yandex.ru, С.С. Зубко¹ 1992sergeyz@mail.ru, Р.И. Джиоев¹ djioev_ri@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Выполнено моделирование рабочих процессов судового дизельного двигателя MAN D&T серии MC с целью снижения выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, влияющих на эмиссию CO₂. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию двигателя. Получены математические модели в виде уравнений регрессии, описывающие влияние исследуемых параметров подачи топлива (степень сжатия, угол опережения впрыска топлива и продолжительность впрыска топлива) на целевые функции – удельный выброс диоксида углерода и эффективная мощность дизельного двигателя 6S60MC. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование полного факторного эксперимента второго порядка. С целью поиска минимального значения выбросов диоксида углерода используя метод обобщенного приведенного градиента решена задача выбора оптимальных значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива для заданной эффективной мощности судового дизельного двигателя 6S60MC. Показано, что, например, при мощности двигателя 10000 кВт снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации указанных параметров топливоподачи будет равно 7,37 %.

Ключевые слова: судовый дизель, отработавшие газы, диоксид углерода, параметры топливоподачи, оптимизация выброса

Для цитирования: Туркин В.А., Игнатенко Г.В., Беляев В.В., Зубко С.С., Джиоев Р.И. Управление параметрами топливоподачи с целью снижения выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями, Морские интеллектуальные технологии 2022. № 4 часть 1, С. 106—112.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.030>

Fuel management to reduce carbon dioxide emissions from marine diesel engines

Vladimir A. Turkin¹ turvla@mail.ru, George V Ignatenko¹ ignatenko.georg@yandex.ru,

Vladimir V Belyaev¹ bv80@yandex.ru, Sergei S Zubko¹ 1992sergeyz@mail.ru, Ruslan I Dzhioev¹ djioev_ri@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Krasnodar region, Russian Federation

Abstract. The simulation of the working processes of the MAN D&T MC series marine diesel engine was carried out in order to reduce carbon dioxide emissions with exhaust gases. The purpose of the simulation was to find design and operational solutions that affect CO₂ emissions. When performing a computational study, a mathematical model of a combined internal combustion engine implemented in the DIESEL-RK computer program was used. The studied variables are the compression ratio, the advance angle and the duration of fuel injection, the values of which can be set without making significant changes to the engine design. Mathematical models are obtained in the form of regression equations that describe the effect of the studied fuel supply parameters (compression ratio, fuel injection advance angle and fuel injection duration) on the target functions - specific carbon dioxide emission and effective power of the 6S60MC diesel engine. To determine the coefficients of the regression equation, planning of a complete factorial experiment of the second order is implemented. In order to find the minimum value of carbon dioxide emissions using the generalized reduced gradient method, the problem of choosing the optimal values of the compression ratio, fuel injection duration and fuel injection advance angle for a given effective power of a 6S60MC marine diesel engine is solved. It is shown that, for example, with an engine power of 10,000 kW, the reduction in carbon dioxide emissions by optimizing the specified fuel supply parameters will be 7.37%.

Keywords: marine diesel, exhaust gases, carbon dioxide, fuel supply parameters, emission optimization

For citation: Vladimir A. Turkin, George V. Ignatenko, Vladimir V. Belyaev, Sergey S. Zubko, Ruslan I. Dzhioev Fuel management to reduce carbon dioxide emissions from marine diesel engines Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 106—112.

Введение

Вступление в силу в 2005 году Приложения 6 «Правила предотвращения загрязнения воздушной

среды с судов» к Конвенции МАРПОЛ 73/78 положили начало планомерной работе Международной морской организации (ИМО) по оздоровлению воздушной среды [1]. Повышение

качества окружающей среды является важнейшей составляющей деятельности человека, направленной на использование природных ресурсов [2, 3]. Морской транспорт несет ответственность за примерно 2.5% мировых выбросов парниковых газов и около 940 миллионов тонн диоксида углерода CO₂ ежегодно [4]. Чтобы снизить выбросы IMO объявила о Стратегии сокращения выбросов парниковых газов с судов [5]. Цель Стратегии состоит в том, чтобы сократить выбросы CO₂ в среднем по международным морским перевозкам как минимум на 40% к 2030 году, стремясь достичь 70% к 2050 году по сравнению с 2008 годом. Стратегией был введен конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ) – (Energy Efficiency Design Index – EEDI) как показатель углеродоемкости судна. EEDI – это индекс, который указывает на энергоэффективность судна и измеряется в граммах CO₂ (генерируемых) на тонну. мили (перевезенный груз), рассчитанная для конкретных исходных условий эксплуатации судна. Снижение индекса EEDI разделено на три этапа: 2015-2019, 2020-2024, 2025 годы и далее. Величина снижения EEDI по сравнению с его исходным значением для указанных этапов составляет соответственно 10%, 20% и 30% [6].

Рост цен на топливо вынуждает судоходные компании искать такие методы, которые одновременно обеспечивают снижение выбросов оксидов углерода без заметного ухудшения топливной экономичности дизельного двигателя. Среди таких методов заслуживают особого внимания те, которые направлены на совершенствование рабочего процесса путем влияния на термодинамику горения топлива в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Одним из способов влияния на термодинамику горения является корректировка влияющих на экологические характеристики регулируемых параметров при эксплуатации судовых дизельных двигателей. К таким параметрам следует отнести степень сжатия, продолжительность и угол опережения впрыска топлива в цилиндр дизельного двигателя.

Влияние [7, 8] продолжительности впрыска топлива и степени сжатия [9, 10] было подробно изучено и изложено во многих научных работах.

В данной статье дается оценка возможности снижения EEDI оптимальной настройкой регулируемых параметров (степень сжатия, продолжительность и угол опережения впрыска топлива в цилиндр) судового дизельного двигателя, позволяющих снизить удельный выброс диоксида углерода с отработавшими газами.

1. Снижение выбросов диоксида углерода организацией рабочего процесса двигателя

Внедрение на судовых дизелях новых типов топливных систем и в первую очередь электронных систем управления подачей топлива позволили оптимизировать рабочие процессы применительно к заданным условиям эксплуатации.

Поиски путей повышения экологических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) ведутся по трем основным направлениям:

- поиск новых видов топлива, при сжигании которых не образуются или образуются в гораздо меньших количествах вредные вещества. К таким

топливам относятся водород, нефтяные газы, топлива биологического происхождения [11];

- разработка методов очистки отработавших газов двигателей от вредных веществ. К таким методам относятся методы физической и химической очистки от вредных химических соединений. Примером разработки методов очистки являются результаты исследований научно-педагогических работников кафедры «Эксплуатация судовых механических установок» Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова [12];

- разработка новых подходов в организации рабочих процессов двигателей, направленных на снижение токсичности отработавших газов [7-10].

В данной публикации рассматривается решение последней задачи, а именно организация, посредством моделирования, рабочих процессов судового дизельного двигателя, направленных на снижение выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. В качестве исследуемых переменных были приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива. Значения этих параметров можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию базового двигателя.

При выполнении вычислительного эксперимента использовалась математическая модель комбинированного ДВС, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК [13]. Этапу проведения расчетных исследований предшествовал этап проверки точности математической модели путем сравнения расчетных данных с результатами натурных экспериментов. Использовались данные, полученные на морских судах группы компаний «Совкомфлот», характеризующие эксплуатационные параметры работы малооборотных двигателей компании «MAN Diesel & Turbo» моделей SMC/-C в широком диапазоне изменения нагрузок [13].

Исходные данные для создания проекта средствами программного комплекса ДИЗЕЛЬ – РК приведены в публикации [13]. Выполненное авторами сравнение эксплуатационных и расчетных значений параметров на режимах работы, соответствующих 85, 75, 50 и 25 % от полной мощности показало в целом хорошее согласование эксперимента с расчетом [13].

Существенным недостатком методики и программы многопараметрической оптимизации рабочих процессов ДВС, реализованной в программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК, является невозможность решения оптимизационных задач сразу на нескольких режимах работы двигателя. В программе реализована только возможность последовательного нахождения набора оптимальных параметров для каждого из режимов, что может не привести к требуемому результату. Так, например, оптимальное значение величины степени сжатия может быть различным для каждого из режимов, а этот параметр задается конструктивно и не подлежит изменению при переходе двигателя на другой режим работы [13].

Для решения оптимизационных задач на различных режимах работы двигателя необходимо получить математическую модель в виде уравнения регрессии, описывающую влияние исследуемых параметров на целевую функцию. При этом

зависимость удельных выбросов диоксида углерода в отработавших газах от исследуемых факторов носит явно нелинейный характер. Следовательно, для математического описания достаточно иметь уравнения регрессии в виде полинома второго порядка, при условии соответствия его критерию адекватности, для которых гораздо лучше разработаны алгоритмы оптимизации с учетом наличия ограничительных параметров [13]. Для получения уравнения регрессии использовался план полного факторного эксперимента [14].

2. Математические модели зависимости выбросов диоксида углерода и мощности двигателя от параметров топливоподачи

С целью получения математической модели, описывающей влияние таких параметров подачи топлива, как степень сжатия, продолжительность впрыска и угол опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC на выброс диоксида углерода и мощность двигателя, эксперименты проводились с учетом теории планирования эксперимента [14] по представленному в таблице 1 плану.

Математическая модель, представляющая собой уравнение регрессии второй степени, в общем случае будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y – значение удельных выбросов диоксида углерода, γ (кВт·час)⁻¹ или мощности двигателя, кВт; x_i, x_j – значения факторов; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значения коэффициентов математической модели.

Для расчета коэффициентов математической модели (1) был реализован полный эксперимент – три фактора на трёх уровнях, то есть эксперимент вида 3³. Для реализации подобного эксперимента

$$y = 630,8 - 52,8x_1 + 96,5x_2 - 84,7x_3 - 46,3x_1x_2 + 44,3x_1x_3 - 91,2x_2x_3 + 52,6x_1x_2x_3 + 8,88x_1^2 + 51,7x_2^2 + 47,3x_3^2; \quad (3)$$

$$y = 630,8 - 26,4(z_1 - 15) + 19,3(z_2 - 15) - 16,95(z_3 - 12,5) - 4,63(z_1 - 15)(z_2 - 15) + 4,43(z_1 - 15)(z_3 - 12,5) - 3,65(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) + 1,05(z_1 - 15)(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) + 2,22(z_1 - 15)^2 + 2,07(z_2 - 15)^2 + 1,89(z_3 - 12,5)^2 \quad (4)$$

Математические модели (3) и (4) позволяют решать задачу поддержания минимального значения удельного выброса диоксида углерода с отработавшими газами оптимизацией значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива судового главного дизельного двигателя 6S60MC.

В модели (3) значения факторов должны приниматься в безразмерной системе координат, то есть в интервале значений от минус 1 до плюс 1.

В модели (4) значения факторов должны приниматься в натуральном масштабе, то есть в интервалах значений: для степени сжатия z_1 от 13 до 17; для продолжительности впрыска топлива z_2 от 10 до 20 градусов поворота коленчатого вала; для угла опережения впрыска топлива z_3 от 7,5 до 17,5

необходимо было провести 3³ = 27 опытов для трёх независимых факторов z_1 – степень сжатия, z_2 – продолжительность впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала (° ПКВ), z_3 – угол опережения впрыска топлива в градусах поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки (° ПКВ до ВМТ) при трех значениях каждого фактора (в безразмерной системе координат это + 1 – максимальное значение фактора; 0 – среднее значение; - 1 – минимальное значение фактора).

Матрица планирования полного факторного эксперимента вида 3³, значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты 27 проведённых опытов и рассчитанные значения исследуемых величин (выброс диоксида углерода и мощность двигателя) также представлены в таблице 1.

Расчет значений коэффициентов математической модели (1) b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} осуществлялся с использованием выражения:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}. \quad (2)$$

3.1. Зависимость выбросов диоксида углерода от параметров топливоподачи

С использованием выражения (2), а также представленного в таблице 1 плана эксперимента были рассчитаны коэффициенты математической модели (1) для оценки выбросов диоксида углерода в зависимости от параметров топливоподачи. Подставив значения коэффициентов и средние величины квадратов значения факторов $\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^2$ [13, 14], получим математические модели со значениями факторов в безразмерной системе координат (3) или в натуральном масштабе (4):

градусов поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки.

С целью определения дисперсии воспроизводимости, знание которой необходимо для проверки адекватности моделей результатам эксперимента по критерию Фишера, по результатам трех параллельных опытов в центре плана были получены следующие значения y :

$$y_1^0 = 623; y_2^0 = 634; y_3^0 = 645; \bar{y}^0 = \frac{\sum_{u=1}^3 y_u^0}{3} = 634.$$

$$\text{Тогда } s_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2}{(u-1)} = 242/2 = 121,$$

где u – количество параллельных опытов в центре плана равное 3.

Таблица 1

Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			Выброс CO ₂ , г·(кВт·час) ⁻¹		Мощность двигателя, кВт	
							из эксперимента	из модели	из эксперимента	из модели
	Z ₁ , степень сжатия	Z ₂ , продолжительность впрыска	Z ₃ , угол опережения впрыска	x ₁	x ₂	x ₃	y	ŷ	y	ŷ
1	13	10	7,5	-1	-1	-1	654,11	633,95	12596	12626
2	13	10	12,5	-1	-1	0	633,78	601,39	13166	13424
3	13	10	17,5	-1	-1	+1	632,59	663,45	13236	13131
4	13	15	7,5	-1	0	-1	803,38	868,87	9735,8	9725,8
5	13	15	12,5	-1	0	0	668,87	692,52	12329	11993
6	13	15	17,5	-1	0	+1	641,82	610,77	13012	13170
7	13	20	7,5	-1	+1	-1	1295,8	1207,2	5546,1	5705,8
8	13	20	12,5	-1	+1	0	811,37	886,99	9737,8	9442,8
9	13	20	17,5	-1	+1	+1	684,82	661,45	11948	12089
10	15	10	7,5	0	-1	-1	633,83	626,78	13093	13021
11	15	10	12,5	0	-1	0	616,23	585,93	13649	13805
12	15	10	17,5	0	-1	+1	616,84	639,68	13657	13499
13	15	15	7,5	0	0	-1	721,47	762,85	11094	10861
14	15	15	12,5	0	0	0	642,55	630,80	12884	12762
15	15	15	17,5	0	0	+1	623,35	593,35	13429	13573
16	15	20	7,5	0	+1	-1	1009,2	1002,3	7287,6	7581,0
17	15	20	12,5	0	+1	0	751,71	779,03	10585	10599
18	15	20	17,5	0	+1	+1	655,93	650,38	12552	12527
19	17	10	7,5	+1	-1	-1	615,92	637,33	13439	13343
20	17	10	12,5	+1	-1	0	602,15	588,18	13980	14114
21	17	10	17,5	+1	-1	+1	605,08	633,63	13943	13794
22	17	15	7,5	+1	0	-1	681,10	674,55	11805	11923
23	17	15	12,5	+1	0	0	623,03	586,80	13295	13458
24	17	15	17,5	+1	0	+1	608,76	593,65	13785	13903
25	17	20	7,5	+1	+1	-1	814,05	815,13	9574,4	9383,3
26	17	20	12,5	+1	+1	0	690,94	688,78	11656	11683
27	17	20	17,5	+1	+1	+1	634,49	657,03	13018	12892
$N=27$ $\sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2$							31410		737002	

Адекватность моделей проверяется по критерию Фишера F с использованием зависимости:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь}$$

$$s_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{(N-l)} = 31410/17 = 1937$$

где l – число значимых коэффициентов в модели, равное 10; \hat{y} – значение выброса CO₂, рассчитанное по модели (3), г·(кВт·час)⁻¹.

Тогда критерий Фишера будет равен:

$$F = 1937/121 = 16,0.$$

Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости $p = 0,05$ и степеней свободы:

$$f_1 = N - l = 17, f_2 = u - 1 = 3 - 1 = 2,$$

$$F_{1-p}(f_1, f_2) = F_{0,05}(17, 2) = 19,4$$

Так как значение критерия Фишера оказалось меньше его табличного значения, то есть $F = 16,0 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$, то математические модели (3) и (4) адекватно описывают результаты

$$y = 12762 + 733x_1 - 1603x_2 + 1356x_3 + 388x_1x_2 - 366x_1x_3 + 1117x_2x_3 - 353x_1x_2x_3 - 36,6x_1^2 - 560x_2^2 - 545x_3^2; \quad (5)$$

эксперимента и могут быть использованы для оценки влияния степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC на значение выбросов диоксида углерода с отработавшими газами.

3.2. Зависимость мощности двигателя от параметров топливоподачи

Аналогично изложенному в подразделе 3.1 с использованием зависимости (2), а также представленного в таблице 1 плана эксперимента были рассчитаны коэффициенты математической модели (1) для оценки мощности двигателя в зависимости от параметров топливоподачи. Подставив в (1) значения коэффициентов и средние величины квадратов значения факторов $\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^2$ получим окончательный вид математической модели для расчета мощности судового дизельного двигателя 6S60MC со значениями факторов в безразмерной системе координат (5) или в натуральном масштабе (6):

$$y = 12762 + 366(z_1 - 15) - 321(z_2 - 15) + 271(z_3 - 12,5) + 38,8(z_1 - 15)(z_2 - 15) - 36,5(z_1 - 15)(z_3 - 12,5) + 44,7(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) - 7,06(z_1 - 15)(z_2 - 15)(z_3 - 12,5) - 9,16(z_1 - 15)^2 - 22,4(z_2 - 15)^2 - 21,8(z_3 - 12,5)^2 \quad (6)$$

В модели (5) значения факторов должны приниматься в безразмерной системе координат, то есть в интервале значений от минус 1 до плюс 1.

В модели (6) значения факторов должны приниматься в натуральном масштабе, то есть в интервалах значений: для степени сжатия z_1 от 13 до 17; для продолжительности впрыска топлива z_2 от 10 до 20 градусов поворота коленчатого вала; для угла опережения впрыска топлива z_3 от 7,5 до 17,5 градусов поворота коленчатого вала двигателя до верхней мертвой точки.

Для определения дисперсии воспроизводимости в центре плана были поставлено три опыта:

$$y_1^0 = 12864; y_2^0 = 12884; y_3^0 = 12931; \bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 12893;$$

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / (u - 1) = 4732 / 2 = 2366.$$

Адекватность полученных моделей (5) и (6) результатам эксперимента проверяется с использованием критерия Фишера:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь}$$

$$s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 737002 / 17 = 43353,$$

где l – число значимых коэффициентов в модели, равное 10.

$$\text{Тогда } F = 43353 / 2366 = 18,3.$$

Табулированное значение критерия Фишера для $p=0,05, f_1=17, f_2=2, F_{1-p}(f_1, f_2)=19,4$.

Так как $F = 18,3 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,4$, то модели (5) и (6) адекватно описывают результаты эксперимента и могут быть использованы для расчета мощности двигателя 6S60MC в зависимости от значений степени сжатия, продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива.

3. Минимизация выбросов диоксида углерода оптимизацией параметров подачи топлива

Математическая модель (3) совместно с моделью (5) позволяет решать задачу поддержания для заданной мощности двигателя минимального значения удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами оптимизацией значений степени сжатия, продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива двигателя 6S60MC.

Решение задачи оптимизации указанных выше параметров осуществлялось с использованием метода обобщенного приведенного градиента [15], реализованного в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решений» [16]. В диалоговом окне «Параметры поиска решения», были установлены параметры: в поле «Оптимизировать целевую функцию» указан адрес ячейки со значением целевой функции (3); выбрано нахождение минимума целевой функции; в поле «Изменяя ячейки переменных» указаны адреса ячеек со значениями переменных x_1, x_2, x_3 ; указано «Поиск решения нелинейных задач методом обобщенного приведенного градиента – ОНПГ».

Затем в диалоговое окно «Параметры поиска решения» вводятся ограничения на переменные $-1 \leq x_1 \leq 1$; аналогичное ограничение на x_2 и x_3 , а также ограничение (5) на эффективную мощность двигателя Ne . Для рассматриваемого примера эффективная мощность принята равной 10000 кВт. То есть в математическую модель 5 вместо y подставляется число 10000.

После нажатия кнопки «Найти решение» на экране компьютера отобразится окно «Результаты поиска решения».

Решение задачи оптимизации степени сжатия продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива судового дизельного двигателя 6S60MC для различных значений эффективной мощности двигателя с целью получения минимальных значений удельных выбросов диоксида углерода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Решение задачи минимизации выбросов CO₂

Мощность двигателя, Ne, кВт	Оптимальные значения параметров двигателя			Выбросы диоксида углерода, г/(кВт·час) ¹
	степень сжатия	продолжительность впрыска топлива, ° ПКВ	угол опережения впрыска топлива, ° ПКВ до ВМТ	
6000	13,3 90	20,0	7,5	1174,3
7000	14,3 72	20,0	7,5	1064,7
8000	15,4 58	20,0	7,5	957,87
9000	16,5 68	20,0	7,5	854,11
10000	17,0	19,32	7,877	777,44
11000	17,0	18,408	8,901	717,67
12000	17,0	17,321	10,094	660,36
	Используемые в эксплуатации значения параметров двигателя			
10000	13,0	20,0	13,4	839,34

В этой же таблице в последней строке показано значение выбросов CO₂ = 839,34 г/(кВт·час) при обычно используемых в эксплуатации значениях рассматриваемых параметров двигателя 6S60MC.

Из приведенного примера решения данной задачи следует, что снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации степени сжатия продолжительности впрыска и угла опережения впрыска топлива, например, при эффективной мощности двигателя, равной 10000 кВт, будет:

$$\delta CO_2 = 100 \cdot (839,34 - 777,44) / 839,34 = 7,37 \%$$

Заключение

Получены математические модели в виде уравнений регрессии, описывающие влияние исследуемых параметров подачи топлива (степень

сжатия, угол опережения впрыска топлива и продолжительность впрыска топлива) на целевые функции – удельный выброс диоксида углерода и эффективная мощность дизельного двигателя 6S60MC. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование полного факторного эксперимента второго порядка.

С целью поиска минимального значения выбросов диоксида углерода используя метод

обобщенного приведенного градиента решена задача выбора оптимальных значений степени сжатия, продолжительности впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива для заданной эффективной мощности судового дизельного двигателя 6S60MC. Показано, что, например, при мощности двигателя 10000 кВт снижение выбросов диоксида углерода за счет оптимизации указанных параметров топливоподачи будет равно 7,37 %.

Литература

1. Иванченко А.А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А.А. Иванченко, А.П. Петров, Г.Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 103-112.
2. Modina M.A., Khekert E.V., Voskanian A.A., Pismenskaia Yu.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021, 867, 012072.
3. Modina M.A., Khekert E.V., Epikhin A.I., Voskanyan A.A., Shkoda V.V., Pismenskaya Yu.V. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, 867, 012104.
4. Stec M., Tatarczuk A., Iluk T., Szul M. Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2021, 108, 103333.
5. Епихин А.И., Модина М.А., Хекерт Е.В. Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3. С. 127-132.
6. Resolution МЕРС.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
7. Jindal S., Nandwana B.P., Rathore N.S., Vashistha V. Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester. Applied Thermal Engineering. 2010. 30. Pp 442-448.
8. Sayin C., Ilhan M., Canakci M., Gumus M. Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends. Renewable Energy. 2008. doi:10.1016/j.renene.2008.10.010.
9. Raheman H., Ghadge S.V. Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing. Fuel. 2008. 87 (12). Pp. 2659-2666.
10. Kegl B. Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. Fuel 2006. 85. Pp. 2377-2387.
11. Privalov V.E., Turkin V.A., Shemanin V.G. Hydrogen Power Capabilities in Water Transport. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 872. 012014.
12. Turkin V.A., Pismenskaya Yu.V., Ignatenko G.V., Aleksandrova V.V. Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 872. 012007.
13. Туркин А.В., Туркин В.А., Самойленко А.Ю. Моделирование рабочих процессов малооборотного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1(39). Т. 1. С.106-110.
14. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.
15. Sharma R., Glemmestad B. On Generalized Reduced Gradient method with multi-start and self-optimizing control structure for gas lift allocation optimization. Journal of Process Control. 2013. 23. Pp. 1129-1140.
16. Шадрин Н.И. Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010 / Н.И. Шадрин, Н.Д. Берман. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного ун-та, 2016. 101 с.

References

1. Ivanchenko A A, Petrov A P, Zhivlyuk G P 2015 Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova* 3 pp 103-112.
2. Modina M A, Khekert E V, Voskanian A A, Pismenskaia Yu V, Epikhin A I, Shkoda V V 2021 Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 867 012072.
3. Modina M A, Khekert E V, Epikhin A I, Voskanyan A A, Shkoda V V, Pismenskaya Yu V 2021 Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 867 012104.
4. Stec M, Tatarczuk A, Iluk T, Szul M 2021 Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process *International Journal of Greenhouse Gas Control* 108 103333.
5. Epikhin A I, Modina M A, Khekert E V 2020 Concept of environmental improvement of ship power plants *Operation of sea transport* 3 pp 127-132.
6. Resolution МЕРС.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
7. Jindal S, Nandwana B P, Rathore N S, Vashistha V 2010 Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester *Applied Thermal*

- Engineering* 30 pp 442-448.
8. Sayin C, Ilhan M, Canakci M, Gumus M 2008 Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel–methanol blends *Renewable Energy*, in press. doi:10.1016/j.renene.2008.10.010.
 9. Raheman H, Ghadge S V 2008 Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing *Fuel* 87 (12) pp. 2659-2666.
 10. Kegl B 2006 Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel *Fuel* 85 pp. 2377-2387
 11. Privalov V E, Turkin V A, Shemanin V G 2021 Hydrogen Power Capabilities in Water Transport *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 872 012014.
 12. Turkin V A, Pismenskaya Yu V, Ignatenko G V, Aleksandrova V V 2021 Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 872 012007.
 13. Turkin A V, Turkin V A, Samoilenko A Yu 2018 Ship low-speed engine working processes modeling to reduce the nitrogen oxides emission *Marine intellectual technologies* 1(39) 1 pp.106-110.
 14. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii*. [Methods of experiment optimization in chemical technology]. M., Vysshaya shkola, 1985, 327 s.
 15. Sharma R, Glemmestad B 2013 On Generalized Reduced Gradient method with multi-start and self-optimizing control structure for gas lift allocation optimization *Journal of Process Contro* 23. Pp. 1129-1140.
 16. Shadrina N.I., Berman N.D. Reshenie zadach optimizatsii v Microsoft Excel 2010. [Solving optimization problems in Microsoft Excel 2010]. Khabarovsk, Izd-vo Tikhookeanskogo gosudarstvennogo un-ta, 2016, 101 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Антонович Туркин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: turvla@mail.ru

Георгий Владимирович Игнатенко, старший преподаватель кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ignatenko.georg@yandex.ru

Владимир Владимирович Беляев, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: bv80@yandex.ru

Сергей Сергеевич Зубко, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: 1992sergeyz@mail.ru

Руслан Игоревич Джиоев, аспирант кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: djoev_ri@mail.ru

Vladimir A. Turkin, Dr. Sci. (Eng)s, Professor, Professor of the Department of Operation of ship mechanical installations, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: turvla@mail.ru

George V Ignatenko, senior lecturer of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: ignatenko.georg@yandex.ru

Vladimir V. Belyaev, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: bv80@yandex.ru

Sergey S. Zubko, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: 1992sergeyz@mail.ru

Ruslan I. Dzhioev, Graduate student of the department of Operation of ship mechanical installations Admiral Ushakov Maritime State University Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation, e-mail: djoev_ri@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2022.

Научная статья

УДК681.5.033.2.621.436:629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.031>

Оценка эффективности работы теплообменного оборудования судового дизеля

А.А. Панасенко¹ AAPanassenko@msun.ru, С.В. Петрашёв¹ petrashov@msun.ru

¹МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Для эффективности работы главного судового дизеля необходимо обеспечивать эффективную передачу теплоты масла, воздуха и охлаждающей пресной воды. Для этого используют теплообменники соответствующих сред, соединенные последовательно. В сложившейся практике, теплообменники по ходу охлаждающей забортной воды соединяются последовательно в строго определенном порядке – холодильник воздуха, затем холодильник масла и последний холодильник пресной охлаждающей воды. В статье проведен анализ эффективности стандартного соединения теплообменников и предложен альтернативный вариант соединения теплообменников по критерию увеличения среднединамической температуры среды по мере увеличения охлаждающей забортной воды. Для сравнения стандартного и альтернативного вариантов соединения теплообменников по ходу забортной воды рассчитаны суммарные потери эксергии каждого из вариантов в статическом режиме работы. Также представлены результаты расчёта дополнительных тепловых потерь вследствие резкого увеличения нагрузки главного двигателя на 20% от номинальной. На основании этих расчетов сделан сравнительный анализ стандартного и альтернативного вариантов соединения теплообменников.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, среднединамическая температура, маслоохладитель, водоохладитель, воздухоохладитель, динамический режим, функциональная схема, система автоматического регулирования, температура охлаждающей забортной воды.

Для цитирования: Панасенко А.А., Петрашёв С.В. Оценка эффективности работы теплообменного оборудования судового дизеля, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 113—117.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.031>

Evaluation of the efficiency of the heat exchange equipment of a marine diesel engine

Andrei A. Panasenکو¹ AAPanassenko@msun.ru, Sergey V. Petrashev² petrashov@msun.ru

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

Abstract. For the efficiency of the operation of the main marine diesel engine, it is necessary to ensure the efficient transfer of heat from oil, air and cooling fresh water. For this, heat exchangers of the corresponding media are used, connected in series. In the current practice, the heat exchangers along the course of the cooling outboard water are connected in series in a strictly defined order - an air cooler, then an oil cooler and the last fresh cooling water cooler. The article analyzes the efficiency of a standard connection of heat exchangers and proposes an alternative option for connecting heat exchangers according to the criterion of an increase in the average dynamic temperature of the medium as the cooling seawater increases. To compare the standard and alternative options for connecting heat exchangers along the outboard water, the total exergy losses of each of the options in the static mode of operation were calculated. Also presented are the results of calculating additional heat losses due to a sharp increase in the load of the main engine by 20% of the nominal one. Based on these calculations, a comparative analysis of the standard and alternative options for connecting heat exchangers was made.

Keywords: heat exchanger, average dynamic temperature, oil cooler, water cooler, air cooler, dynamic mode, functional diagram, automatic control system, temperature of the cooling outboard water.

For citation: Andrei A. Panasenکو, Sergey V. Petrashev, Evaluation of the efficiency of the heat exchange equipment of a marine diesel engine, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 113—117.

Актуальность проблемы

При работе судового главного двигателя наряду с обеспечением необходимой мощности установки также необходимо обеспечивать эффективность работы совместно работающих теплообменных аппаратов.

В дизельных установках объектами охлаждения являются составные части дизеля (газотурбонагнетатели, цилиндры втулки, поршни и подшипники двигателя). Для поддержания оптимального температурного режима в системах

двигателя существуют охладители воздуха, масла и воды. Всё тепло, в конечном итоге, забирает забортная вода. В некоторых конструкциях используется последовательное охлаждение забортной водой воздуха, масла и пресной воды (рис. 1).

Подобная схема (рис. 1) представлена на тренажёре «Дизельсим» DPSM21, который эксплуатируется в МГУ им. адм. Г.И. Невельского с 1992 года. Для поддержания температуры забортной воды используется способ перепуска. Для корректировки температур воздуха, масла и пресной

воды используется обводные клапаны (на рис. 1 не показаны).

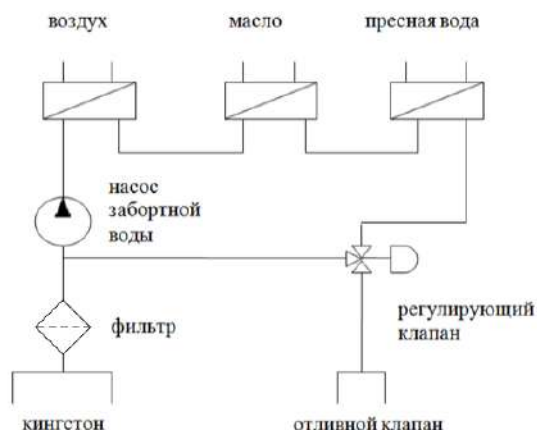


Рис. 1. Рассматриваемая схема охлаждения

В соответствии с [1] 8,7% теплоты сгоревшего топлива расходуется на воздухоохладитель, 3,5% расходуется на охладитель смазочного масла, 15,7% теплоты уходит с охлаждающей водой цилиндров и турбокомпрессоров.

При проектировании системы охлаждения заборной воды руководствуются, вероятнее всего, следующими доводами: сначала расположить теплообменники с конечными температурами сред, идущими по возрастающей. Поэтому первым располагается воздухоохладитель, затем маслоохладитель, и последним располагается водоохладитель.

Постановка задачи

Именно последовательность осуществления теплообмена вызывает вопрос о правильности в части эффективности расположение теплообменников - традиционно сначала идёт воздухоохладитель, затем маслоохладитель и самый последний идёт водоохладитель. Возникает вопрос об ином более эффективном расположении теплообменников. Более эффективным представляется расположение теплообменников в порядке возрастания среднединамических температур охлаждаемых сред.

Таблица 1

Температуры охлаждаемых сред					
Температуры воздуха		Температуры масла		Температуры воды	
До охлажд. дения	После охлажд. дения	До охлажд. дения	После охлажд. дения	До охлажд. дения	После охлажд. дения
160 °С	50 °С	55 °С	50 °С	80 °С	76 °С

В соответствии с расчётной (табл. 2) среднединамическая температура увеличивается от теплообменника масла к теплообменнику воды и далее к теплообменнику воздуха.

Традиционно анализ эффективности проводится для установившегося стационарного режима работы энергетической установки. Так как потери теплоты рассчитываются при постоянной среднединамической (среднегарифмической) температуре охлаждающей воды, энергетический анализ не даст решения по вопросу оптимального

расположения теплообменников. Пользу может принести эксергетический анализ, в котором учитываются потери качества энергии [2, 3, 4].

Таблица 2

Среднединамическая температура охлаждаемых сред

Среднединамическая температура		
воздуха	масла	воды
375 К	325 К	351 К

Примем температуру заборной воды на входе в первый теплообменник равной 20°С, конечная температура - 40 °С. Считаем, что коэффициенты теплопередачи остаются неизменными, в этом случае среднединамические температуры заборной воды при традиционном и альтернативном расположении теплообменников рассчитаны и приведены в табл. 3.

Таблица 3

Среднединамическая температура заборной воды

Вариант расположения теплообменников	Среднединамическая температура заборной воды при теплообмене		
	с воздухом	с маслом	с водой
Традиционный	296,1 К	300,5 К	307,3 К
Альтернативный	309,9 К	294,3 К	294,3 К

Потери эксергии при расположении теплообменников - воздух, масло, вода - по ходу заборной воды представлены в таблице 4. Альтернативный вариант потерь эксергии при расположении теплообменников - масло, вода, воздух - по ходу заборной воды представлены в таблице 5.

Таблица 4

Эксергетические потери при традиционном варианте расположения теплообменных аппаратов

Эксергетические потери в теплообменных аппаратах		
воздуха	масла	воды
1,811%	0,257%	1,864%

Таблица 5

Эксергетические потери при альтернативном варианте расположения теплообменных аппаратов

Эксергетические потери в теплообменных аппаратах		
воздуха	масла	воды
1,428%	0,330%	2,170%

Как видно из табл. 3, 4, при традиционном расположении теплообменников по ходу заборной воды, потери эксергии вследствие конечной разности температур выше альтернативного варианта на 0,004%.

Известно, что анализ статического режима в некоторых случаях, в которых большую долю времени занимают динамические процессы, не даёт верный ответ на поставленную задачу [5].

Авторами поставлена задача оценки дополнительных потерь энергии из-за несовершенства динамических процессов. Предполагается, что наименьшие потери будут у процесса без забросов регулируемого параметра.

Предлагается смоделировать в среде математического пакета MathCad динамические процессы изменения температуры забортной воды и посредством математического аппарата [6]. оценить качество этих процессов.

Решение задачи

При моделировании переходных процессов принимается, что постоянная времени нагрева пресной воды больше постоянной времени нагрева смазочного масла, а постоянная нагрева наддувочного воздуха больше постоянной времени нагрева пресной воды. Каждый теплообменный аппарат описывается дифференциальным уравнением второго порядка [7]. При моделировании любого из теплообменников, используется параллельное соединение двух звеньев первого порядка (рис. 2). Исследуется динамический режим изменения температуры забортной воды после маслоохладителя, водоохладителя и воздухоохладителя вследствие изменения нагрузки дизеля на 20% от исходного режима. Так как при увеличении нагрузки дизеля увеличивается отвод теплоты во всех трёх средах (воздух, масло, пресная вода), то принимается увеличение нагрузки на каждый теплообменник на 20%. Первым вариантом рассматривается традиционное расположение теплообменников: воздухоохладитель - маслоохладитель - водоохладитель (рис. 2).

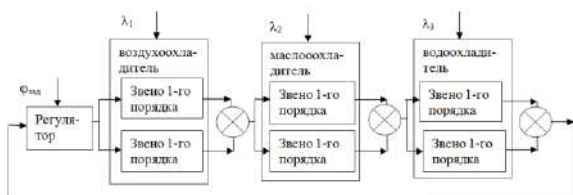


Рис. 2 Структурная функциональная схема системы автоматического регулирования температуры охлаждающей забортной воды

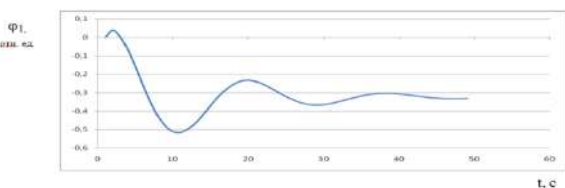


Рис. 3 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после воздухоохладителя

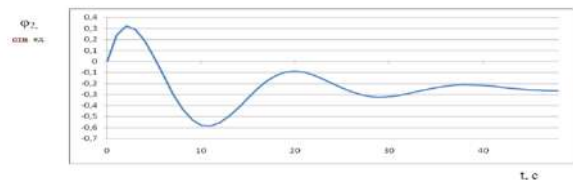


Рис. 4 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после маслоохладителя

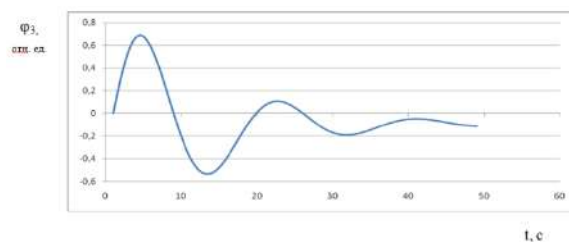


Рис. 5 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после водоохладителя

Вторым вариантом рассматривается альтернативное расположение теплообменников: маслоохладитель - водоохладитель - воздухоохладитель. Структурная функциональная схема системы представлена на рис. 6.

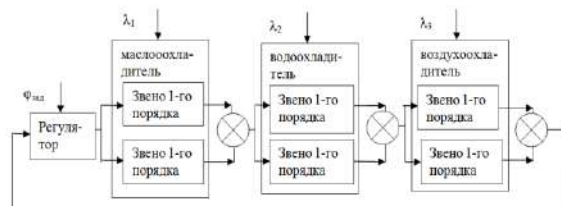


Рис. 6 Структурная функциональная схема системы автоматического регулирования температуры охлаждающей забортной воды при альтернативном расположении теплообменников

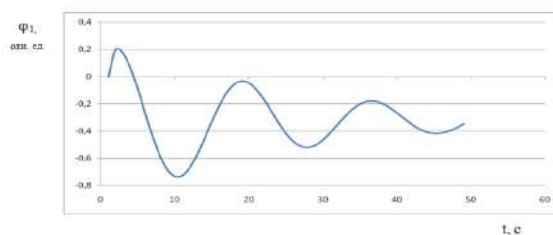


Рис. 7 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после маслоохладителя

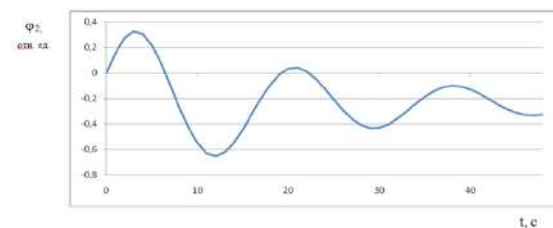


Рис. 8 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после водоохладителя

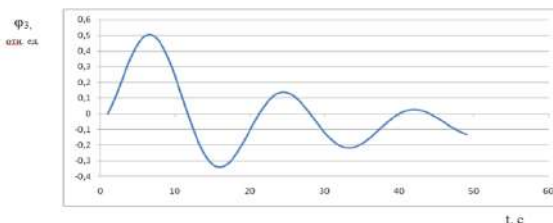


Рис. 9 Динамический процесс изменения температуры забортной воды после воздухоохладителя

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - обозначены относительные температуры на выходе из теплообменников.

И при традиционном и при альтернативном вариантах расположения теплообменников используется пропорционально-интегральный регулятор для поддержания на постоянном уровне температуры забортной воды на выходе из последнего по ходу забортной воды теплообменника.

Анализ качества переходного процесса оценивается по величине длины переходного процесса, показатель опробован в работе [5]. В этом случае более оптимальный переходный процесс - такой, при котором будет меньшая длина переходного процесса.

Расчет отрезка длины кривой ведем по формуле

$$\Delta l = \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta t)^2},$$

где $\Delta\varphi$ - отклонение регулируемой величины,

Δt - отрезок времени, за который произошло

отклонение регулируемой величины $\Delta\varphi$ [8].

Расчет длины кривой переходного процесса ведем по формуле

$$l = \sum_0^{t_k} \Delta l_i,$$

где t_k - время окончания переходного процесса.

Окончание переходного процесса происходит при вхождении в зону нечувствительности регулятора, для судна зона нечувствительности принимается равной 1°C [8].

Данные по сравнительной оценке переходных процессов существующего и альтернативного вариантов расположения теплообменников даны в табл. 6.

Таблица 6

Длина кривой переходного процесса температуры охлаждающей морской воды

Вариант расположения теплообменников	На выходе охладителя воздуха	На выходе охладителя масла	На выходе охладителя пресной воды
Традиционный	61,0824	62,8413	61,7773
Альтернативный	60,1076	62,7332	61,5389

Заключение и выводы

В статье была обозначена проблема совершенствования процессов теплообмена путём изменения расположения теплообменников по ходу потока забортной воды. Для этого были рассчитаны потери работоспособной части энергии [9, 10] при традиционном и альтернативном вариантах расположения теплообменников главного судового двигателя. Также была произведена оценка потерь энергии из-за динамических процессов. Для решения поставленной задачи смоделированы в среде математического пакета MathCad динамические процессы изменения температуры забортной воды и посредством математического аппарата оценено качество этих процессов. Соответствующая задача была решена. Получен результат, который свидетельствует, что потери эксергии при альтернативном варианте расположения теплообменников меньше, чем при традиционном расположении теплообменников. Также показано, что потери энергии при динамических процессах меньше при альтернативном варианте расположения теплообменников.

Литература

1. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 2 / И.В. Возницкий, А.С. Пунда – М.: Моркнига, 2010.- 382 с.
2. Цирлин А.М. Методы оптимизации в необратимой термодинамике и микроэкономике. – М.: Физматлит, 2003. – 416 с.
3. Линецкий С.Б., Цирлин А.М. Оценка термодинамического совершенства и оптимизация теплообменников // Теплоэнергетика. 1988. № 10. С. 87-91.
4. Slesarenko V.N., Panasenko A. A. Thermodynamic perfection of auxiliary boiler installations // Proceedings of the Symposium. «The First International Exergy. Energy and Environment (IEEES-1): - Izmir, Turkey, 2003 - P. 29-32.
5. Панасенко А.А. Оценка эффективности работы судового двигателя в динамических процессах // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2021. №3 (август). С. 74–81.
6. Dynamic simulation and optimal heat management policy of a coupled solar reforming–heat storage process. Chem. Eng. Res. Des. (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.05.024>
7. Панасенко А. А. Основы автоматики и теории управления техническими системами. Задания для самостоятельной работы : учеб.-метод. пособие – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2018. – 33 с.
8. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн Г., Корн Т. - М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
9. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. - М.: Мир, 2002. - 461 с.
10. Szargut, J. (1980). International progress in second law analysis, *Energy*, 5, 709-718. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(80\)90090-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(80)90090-0)

References

1. Voznitsky I.V. Ship internal combustion engines. Volume 2 / I.V. Voznitsky, A.S. Punda - M.: Morkniga, 2010.- 382 p.
2. Tsirlin A.M. Optimization methods in irreversible thermodynamics and microeconomics. – M.: Fizmatlit, 2003. – 416 p.
3. Linetsky S.B., Tsirlin A.M. Assessment of thermodynamic perfection and optimization of heat exchangers. *Teploenergetika*.1988. No. 10. S. 87-91.

4. Slesarenko V.N., Panasenko A. A. Thermodynamic perfection of auxiliary boiler installations // Proceedings of the Symposium. «The First International Exergy. Energy and Environment (IEEEES-1): - Izmir, Turkey, 2003 - P. 29-32.
5. Panasenko A.A. Evaluation of the efficiency of the ship engine in dynamic processes // Bulletin of ASTU. Ser.: Marine equipment and technology. 2021. No. 3 (August), pp. 74–81.
6. Dynamic simulation and optimal heat management policy of a coupled solar reforming–heat storage process. Chem. Eng. Res. Des. (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2017.05.024>
7. Panasenko A. A. Fundamentals of automation and control theory of technical systems. Tasks for independent work: textbook.-method. allowance - Vladivostok: Mor. state un-t, 2018. - 33 p.
8. Handbook of mathematics for scientists and engineers. Korn G., Korn T. - M.: Nauka Main edition of physical and mathematical literature, 1984.
9. Prigogine I., Kondepudi D. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures. - M.: Mir, 2002. - 461 p.
10. Szargut, J. (1980). International progress in second law analysis, *Energy*, 5, 709-718. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(80\)90090-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(80)90090-0)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Александрович Панасенко, к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации автоматизированных судовых энергетических установок МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

Сергей Владимирович Петрашёв, к.т.н., доцент, профессор кафедры теории и устройства судна, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: petrashov@msun.ru

Andrei A. Panasenko, PhD in Engineering Science, Associate Professor of Ship's Power Plants Automation Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi. 690059, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia.

Sergey V. Petrashev, PhD in Engineering Science, Professor of the Theory and Vessel Construction Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi. 690059, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.032>

Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок

В.Н. Стаценко¹ vladsta@mail.ru, Л.Б. Леонтьев² leontyev.l.b@yandex.ru, Р.Х. Садыков¹ sadykov_rh@bk.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,

Аннотация. Для снижения концентрации вредных газовых выбросов и аэрозолей судовых дизелей предлагается использование жидкостной нейтрализации. В процессе нейтрализации организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При движении выхлопных газов или загрязненного воздуха между пластинами пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества. На экспериментальном стенде проведено исследование интенсивности абсорбции в пленку воды углекислого газа. В экспериментах изменялись скорость газа, расход жидкости, концентрация вредных веществ в газе. В результате анализа полученных результатов выявлена оптимальная скорость газа, оптимальное значение орошения. При этом концентрацию двуокиси углерода возможно снизить на 30-45 % на длине контакта 0,6-1 м. Обобщение полученных результатов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного газа получено в виде зависимости между критериями Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля.

Ключевые слова: газовые выбросы, жидкостная нейтрализация, пленка, вода, абсорбция, экспериментальный стенд, двуокись углерода, концентрация, критерии.

Для цитирования: Стаценко В.Н., Леонтьев Л.Б., Садыков Р.Х. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации газовых выбросов судовых энергетических установок. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 118—122.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.032>

Research of film liquid neutralization of gas emissions from ship power plants

Vladimir N. Statsenko¹ vladsta@mail.ru, Lev B. Leont'ev² leontyev.l.b@yandex.ru,

Ruslan Sadykov¹ sadykov_rh@bk.ru

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,

²Marine State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. To reduce the concentration of harmful gas emissions and aerosols of marine diesel engines, the use of liquid neutralization is proposed. In the process of neutralization, a film flow of liquid over vertical plates is organized. When exhaust gases or polluted air move between the plates, the liquid film as an absorbent intensively absorbs gaseous and solid pollutants. On the experimental bench, the intensity of carbon dioxide absorption into the water film was studied. In the experiments, the gas velocity, liquid flow rate, and the concentration of harmful substances in the gas were changed. As a result of the analysis of the obtained results, the optimal gas velocity and the optimal irrigation value were revealed. At the same time, the concentration of carbon dioxide can be reduced by 30-45% at a contact length of 0.6-1 m. The generalization of the results obtained in a wide range of changes in gas concentrations, liquid flow rates, and the rate of movement of polluted gas is made in the form of a criterion dependence between the Nusselt, Reynolds and Prandtl criteria.

Key words: gas emissions, liquid neutralization, film, water, absorption, experimental stand, carbon dioxide, concentration reduction, generalization, criteria.

For citation: Vladimir N. Statsenko, Lev B. Leont'ev, Ruslan H. Sadykov Research of film liquid neutralization of gas emissions from ship power plants. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 118—122.

Введение

Выпускные газы судовых дизелей содержат твердые частицы несгоревшего топлива, а также вредные продукты сгорания. Всего в выпускных газах дизелей обнаружено около 200 компонентов, поэтому суда должны оборудоваться системой их очистки.

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред в жидкость, нисходящее движение которой организуется внутри вертикальных труб или на

плоской вертикальной поверхности [1, 4]. Такие аппараты возможно использовать и для очистки уходящих газов, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или при проведении различных технологических операций, связанных с выбросами значительного количества токсичных газов и аэрозолей [3, 5].

Для выполнения расчетов процессов абсорбции при различных условиях необходимо знать величины коэффициентов массоотдачи между газом и пленкой жидкости β . При массопередаче между газом и жидкостью существуют сопротивления газовой и жидкой фаз. Доля каждого из фазовых

сопротивлений определяется растворимостью газов. Для хорошо растворимых газов доля сопротивления жидкой фазы невелика, этим сопротивлением пренебрегают. К этим газам можно отнести NH_3 , HCl , SO_2 .

Для плохо растворимых газов (CO_2 , CO , NO) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Тогда сопротивлением газовой фазы можно пренебречь.

Для умеренно растворимых газов сопротивления каждой из фаз соизмеримы и пренебрегать ими нельзя.

При массоотдаче между абсорбируемым газом и пленкой большое значение имеет физико-химические свойства жидкости и может происходить процесс хемосорбции [7]. При поглощении, в частности, двуокиси углерода CO_2 раствором карбоната натрия происходит химическая реакция и часть CO_2 переходит в связанное состояние с образованием нерастворимого осадка, и концентрация растворенной окиси углерода понижается, соответственно абсорбционная способность раствора повышается. Скорость химической реакции между CO_2 и раствором карбоната натрия имеет относительно низкие значения, поэтому можно считать, что основное сопротивление массопереносу для оксида углерода сосредоточено в жидкой фазе.

Для описания процессов тепло- и массообмена в пленочных аппаратах обычно используются критериальные уравнения. Каждое из них применимо для определенных условий организации рабочего процесса, конструктивных особенностей аппаратов и т.д. При этом большинство результатов по массообмену обобщается критериальным уравнением вида

$$Nu_D = A Re_r^m Re_{пл}^n Pr_D^p \quad (1)$$

Здесь $Nu_D = \beta l / D$ – критерий Нуссельта, диффузионный; Re_r – критерий Рейнольдса, газовый; $Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_V$ – критерий Рейнольдса, пленочный; $Pr_D = \nu / D$ – критерий Прандтля, диффузионный; β – коэффициент массоотдачи, м/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; l – определяющий размер, м; $\Gamma_V = G_{пл} / \Pi$ – орошение пластины пленкой жидкости, м²/с; $G_{пл}$ – расход пленки воды, м³/с; Π – смоченный периметр рабочего канала, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Константы A , m , n , p – имеют значительные расхождения, особенно при малых $Re_{пл}$. Это объясняется тем, что исследователи работали в узких диапазонах изменения $Re_{пл}$ и применяли различные условия эксперимента.

Цель настоящей статьи – обобщить в критериальной форме результаты исследования интенсивности снижения концентрации двуокиси углерода в установке жидкостной пленочной нейтрализации. Для реализации этой цели необходимо разработать методики экспериментов и методологию их проведения, на основе полученных экспериментальных результатов разработать методику их критериальной обработки и получить численные значения критериальных зависимостей.

Описание технического решения

В нашей работе для очистки воздуха от газовых выбросов и аэрозолей предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [2, 8]. Эта установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства, с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса фильтра. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением и малым брызго- и влагуносом, что является важным фактором для очистки выхлопных газов двигателей.

Для изучения рабочих процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлись латунные пластины длиной 1100 и 600 мм [8]. Они жестко закреплены в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществляется через пленкообразующее устройство, пленка воды движется вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух движется вверх, при их контакте происходят процессы абсорбции газов в пленку жидкости и осаждение твердых частиц на поверхности пленки. Для измерения скорости воздуха используется трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определяется объемным способом и контролируется по жидкостному манометру.

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации различных газовых и аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. В настоящей работе в качестве газового загрязнения используется двуокись углерода CO_2 , начальная концентрация задавалась в диапазоне 1,2-4,5 %.

Результаты измерений изменения концентрации двуокиси углерода CO_2 по длине контакта в воде при скорости воздуха $V_{воз} = 1-4$ м/с представлены на рис. 1. В качестве характеристик процесса абсорбции использовались критерии Re_r (газовый) и $Re_{пл}$ (пленочный)

$$Re_r = V_{воз} d_{экр} / \nu_r, \quad (2)$$

$$Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_{пл}, \quad (3)$$

где $d_{экр} = \sqrt{4S/\pi}$ – эквивалентный диаметр, м; S – площадь сечения рабочего канала, м².

При исследованиях абсорбции двуокиси углерода в пленку воды получены следующие результаты.

1. Зависимость снижения концентрации газа по длине рабочей пластины имеет экспоненциальный характер. Наиболее значительное изменение концентрации происходит на начальном рабочем участке.

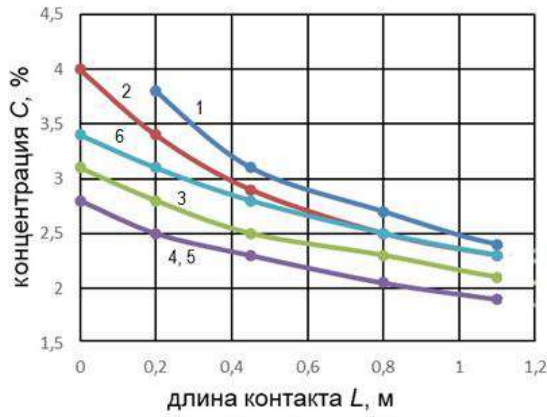


Рис. 1. Изменение концентрации CO₂ по длине контакта; $t_f=17^\circ\text{C}$;
 $Re_f=20 \cdot 10^3$; 1 – $Re_{пл}=110$; 2 – 230;
 $Re_a=31 \cdot 10^3$; 3 – $Re_{пл}=76$; 4 – 45; 5 – 28;
 $t_f=120^\circ\text{C}$; 6 – $Re_f=19 \cdot 10^3$; $Re_{пл}=76$.

2. Интенсивность изменения концентрации газа по длине значительно зависит от начальной его концентрации. Чем выше начальная концентрация, тем значительней ее изменение.

3. При использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет $V_{воз}=0,8-1$ м/с, оптимальное значение орошения составляет $\Gamma_v = (3,3-3,8) \times 10^{-4}$ м²/с. При этом концентрация газа CO₂ снижается на 30-45 %.

4. Расход жидкости слабо влияет на интенсивность абсорбции. Так, в диапазоне изменения критерия $Re_{пл}=28-76$ (кривые 3, 4, 5) изменение концентраций отличается незначительно.

Результаты обобщения

Обобщение результатов исследований абсорбции двуокиси углерода CO₂ в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев, представленных в (1) с учетом размерных параметров пленочного течения жидкости, предложенного в [6]

$$Nu_D = A Re_f^m Re_{пл}^n Pr_D^p (\delta/L)^k. \quad (4)$$

Здесь $Nu_D = g_f \delta / (\rho \cdot D \cdot \Delta C)$ - критерий Нуссельта, диффузионный; $g_f = G_{аб} / S_{аб}$ - удельный поток абсорбированного газа, кг/(м²·с); $S_{аб} = \Gamma \cdot \Delta L$ - площадь абсорбции, м²; ΔL - участок канала, м; ΔC - концентрационный напор (движущая сила абсорбции), кг/м³; ρ - плотность среды, кг/м³; δ - толщина пленки, м; L - длина контакта, м; $Pr_D = \nu_{пл} / D$ - критерий Прандтля, диффузионный; $\nu_{пл}$ - кинематическая вязкость воды, м²/с. Остальные составляющие критериев Re_f и $Re_{пл}$ представлены в уравнениях (1-3). В расчетах критериев Re_f , $Re_{пл}$ и Pr_D использованы экспериментальные и справочные данные.

При расчете критерия Nu_D поток абсорбированного газа $G_{аб}$ (кг/с) на каждом участке рабочего канала ΔL находится по измеренным значениям его концентрации в потоке воздуха перед C_{i-1}^r и за участком C_i^r (кг/м³)

$$G_{абт} = G_{воз} (C_{i-1}^r - C_i^r). \quad (5)$$

Здесь $G_{воз}$ - расход воздуха в рабочем канале, м³/с.

Концентрация абсорбированного газа в пленке воды в конце участка $C_i^{пл}$ (кг/кг) и концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по следующим зависимостям

$$C_i^{пл} = C_{i-1}^{пл} + \frac{G_{абт}}{G_{плт}}, \quad (6)$$

$$\Delta C = C_i^r - C_i^{пл}. \quad (7)$$

Здесь $C_{i-1}^{пл}$ - концентрация абсорбированного газа в пленке перед участком рабочего канала, кг/кг; C_i^r , $C_i^{пл}$ - значения концентраций газа в воздухе и пленке в конце участка, кг/кг; $G_{плт}$ - массовый расход пленки воды, кг/с.

При расчете средних значений коэффициента массоотдачи на участках разной длины контакта концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по средним значениям концентраций в воздухе и пленке.

При противоточном движении воздуха и пленки воды расчет начальной концентрации абсорбированного газа в воде (кг/кг) производился по массовому балансу по зависимости

$$C_0^{пл} = \frac{G_{воз} (C_0^r - C_L^r)}{G_{плт}}. \quad (8)$$

Здесь C_0^r , C_L^r - концентрация газа в воздухе в начале и конце рабочего канала, кг/м³.

Конечная (по ходу воздуха) концентрация абсорбированного газа в воде $C_{пл, Lm}^r = 0$.

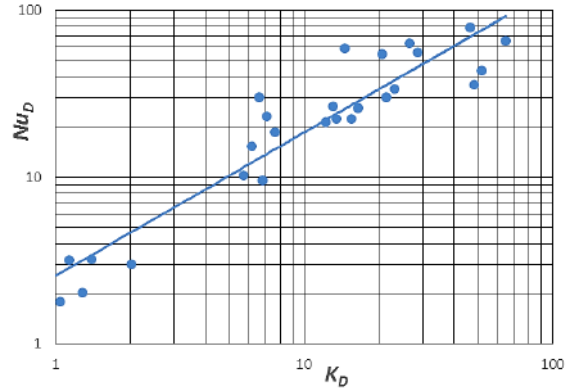


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных по локальным значениям абсорбции CO₂ в безразмерных координатах

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO₂ в пленке пресной воды для локальных значений на каждом участке рабочего канала получены в широком диапазоне изменения критериев Re_f , $Re_{пл}$ и представлены на рис. 2. Критериальное уравнение, описывающее результаты этих исследований имеет вид

$$Nu_D = 2,6 Re_f^{0,5} Re_{пл}^{0,13} Pr_D^{0,28} (\delta/L)^{0,86} \quad (9)$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этим уравнением с погрешностью $\pm 15\%$.

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO₂ в пленке пресной воды для средних значений массоотдачи на участках

рабочего канала разной длины представлены на рис. 3. Критериальное уравнение, описывающее результаты этих данных имеет вид

$$Nu_D = 5,1 Re_f^{0,45} Re_{пл}^{0,11} Pr_D^{0,25} (\delta/L)^{0,76} \quad (10)$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этим уравнением с погрешностью $\pm 15\%$.

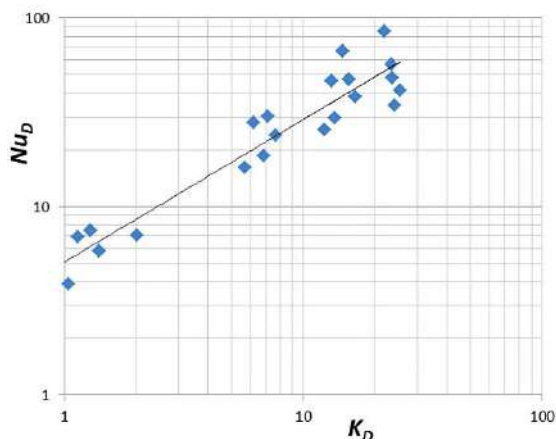


Рис. 3. Обработка экспериментальных данных по средним значениям абсорбции CO_2 в безразмерных координатах

Полученные критериальные зависимости по локальным и средним значениям абсорбции углекислого газа в пленку воды позволяет рассчитать значения коэффициентов массоотдачи и абсорбции газа в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций газа,

расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

Заключение

В результате анализа процесса абсорбции двуокиси углерода в пленочном жидкостном аппарате можно сделать вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость движения газов составляет $V_{воз} = 0,8-1$ м/с, оптимальное значение орошения составляет $\Gamma_v = (3,3-3,8) \times 10^{-4}$ м²/с, при этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45 %.

Этот метод может использоваться для очистки выхлопных газов судовых дизелей, технологических выбросов, а также выпускных газов от различных энергетических установок, в которых обычно содержатся те же токсичные газообразные компоненты и твердые частицы. Жидкостные нейтрализаторы являются обязательной составляющей систем нейтрализации отработанных газов для специальных подземных установок с дизелями, для дизельных погрузочно-транспортных машин и специального самоходного оборудования, которые работают во взрывоопасной среде (шахтах, рудниках и т.д.). Системы жидкостной нейтрализации применяются также для судовых дизельных установок, где в качестве рабочей жидкости используется забортная вода.

Основной задачей следующих исследований является определение изменения концентрации таких токсичных составляющих выхлопных газов как CO , SO_2 , NO и NO_2 , а также аэрозольных загрязнений от длины контакта при жидкостной пленочной нейтрализации. Результаты этих исследований будут обобщаться в виде критериальных зависимостей.

Литература

1. Абсорбция газовых примесей. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379>.
2. Бернавская М.В., Стаценко В.Н.. Комплексное решение проблемы экологической безопасности автономных гидротехнических сооружений. Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск), 2014, № 12, с.3-12.
3. Вострикова М.А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015, №4, с.66-69.
4. Генералов М.Б., Александров В.П., Алексеев В.В. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств, 2004, 832 с.
5. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 213 с.
6. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. О совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции// Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979, с. 278-284.
7. Старкова А.В., Махоткин А.Ф., Балыбердин А.С., Махоткин И.А. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия. Вестник Казанского технологического университета, 2011, с.76-81.
8. Стаценко В.Н., Еременко М.А., Бернавская М.В. Метод жидкостной пленочной нейтрализации токсичных газовых выбросов. Вестник инженерной школы ДВФУ, 2020, № 2(43), с.88-95. DOI: [dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9)

References

1. Absorption of gas impurities. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379>
2. Bernavskaya M.V., Statsenko V.N. A comprehensive solution to the problem of environmental safety of autonomous hydraulic structures. Remote methods, technical means and algorithms in applied problems of studying natural

environments. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). Individual articles (special issue), 2014, No. 12, s.3-12.

3. Vostrikova M.A. Analysis of the efficiency of the systems for cleaning the flue gases of marine vessels from impurities using absorbers and scrubbers. Bulletin of BSTU imyu V.G. Shukhov, 2015, No. 4, s.66-69.
4. Generalov M.B., Alexandrov V.P., Alekseev V.V. Machines and apparatus for chemical and petrochemical industries, 2004, 832 s.
5. Grishagin V.M. Welding aerosol: education, research, localization, application: monograph. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2011, 213 s.
6. Nakoryakov V.E., Grigorieva N.I. On joint heat and mass transfer during film absorption// Heat transfer and hydrodynamics during boiling and condensation. - Novosibirsk: ITF SO AN USSR, 1979. s.278-284.
7. Starkova A.V., Makhotkin A.F., Balyberdin A.S., Makhotkin I.A. Mechanism and kinetics of chemisorption of carbon dioxide by an aqueous solution of sodium carbonate. Bulletin of the Kazan Technological University. 2011. s.76-81.
8. Statsenko V.N., Eremenko M.A., Bernavskaya M.V. Method of liquid film neutralization of toxic gas emissions. Bulletin of the FEFU School of Engineering. 2020. No. 2(43), s.88-95. DOI: dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-9

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Николаевич Стаценко, доктор технических наук, профессор, профессор департамента промышленной безопасности, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Россия, 690922, e-mail: vladsta@mail.ru

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

Руслан Ханафьевич Садыков, старший преподаватель департамента промышленной безопасности, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Россия, 690922, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Vladimir N. Statsenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Safety, Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, FEFU Campus, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia, 690922, e-mail: vladsta@mail.ru

Lev B. Leontyev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of technology and organization of ship repair, Marine State University, Vladivostok, Russian Federation, 50a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, Russia, 690003, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Ruslan H. Sadykov, Senior Lecturer of the Department of Industrial Safety, Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, FEFU Campus, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia, 690922, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.10.2022.

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.033>

Результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля

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

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Высокий уровень тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания современных судовых дизелей, является одним из главных факторов, снижающих их эксплуатационную надежность и существенно затрудняющих их форсировку по параметрам рабочего процесса. Это заставляет исследователей уделять вопросам теплообмена в судовых дизелях все большее внимание с целью создания надежных математических моделей для задания граничных условий при оценке теплового и напряженно-деформированного состояния камеры сгорания на стадии проектирования. Как известно, результативность математического моделирования в технике во многом зависит от эффективности методов количественного анализа построенных моделей. При этом проверка их адекватности требует надежных опытных данных по параметрам локального теплообмена в камере сгорания судовых дизелей. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов экспериментального исследования локального теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14. Представленные в статье экспериментальные значения колебаний температуры и локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндра указанного дизеля весьма существенно дополняют базу данных по параметрам локального теплообмена в камере сгорания. Это дает возможность еще на стадии проектирования провести количественный анализ построенных математических моделей и сделать прогноз эксплуатационной надежности деталей камеры сгорания судовых высокооборотных дизелей.

Ключевые слова: судовый дизель, эксперимент, теплообмен, локальный тепловой поток, камера сгорания

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 123—127.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.033>

Results of experimental investigation of local heat fluxes on surface of cap cylinders of marine high speed diesel

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

¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. High level of thermal power of details developing of combustion chamber modern marine diesels, is one of the main factor decreasing its exploitation security and substance impeding their force according to parameters of working process. It causes researchers to pay more attention to questions of heat transfer in marine diesels with purpose design secure of mathematical models for the task boundary conditions for value thermal and power-deform condition combustion chamber details during design. It is known that resulting of mathematical modelling in technics noticeably depends on efficiency of methods in quantity analysis developed models. Thus, verification adequate demand secure experimental data for parameters of local heat transfer in marine diesels combustion chamber. The purpose this article is presentation and discussion of experimental results in local heat transfer in marine high speed 8 ChN 13/14 diesel combustion chamber. Experimental data fluctuations of temperature and local heat fluxes on the surface cap of cylinder the diesel are given and addition base of data on parameters local heat transfer in combustion chamber. It is possible to make quantity analysis of mathematical models in design period and make prognosis of exploitation security in details of marine high speed diesels combustion chamber.

Key words: marine diesel, experiment, heat transfer, local heat flux, combustion chamber

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V., Results of experimental investigation of local heat fluxes on surface of cap cylinders of marine high speed diesel, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 123—127.

Введение

Высокий уровень тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС) современных судовых дизелей является одним из главных факторов, снижающих их эксплуатационную надежность и существенно затрудняющих их форсировку по параметрам рабочего процесса. Это

заставляет исследователей уделять вопросам теплообмена в судовых дизелях все большее внимание с целью разработки надежных методик для задания граничных условий со стороны рабочего тела при оценке теплового и напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей КС на стадии проектирования. В настоящей статье представлены результаты экспериментального

исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля 8 ЧН 13/14 с дифференцированной оценкой составляющих теплового потока.

Методика экспериментального определения локальных тепловых потоков на поверхности деталей КС

В основу проведения опытов была положена методика, основанная на измерении колебаний температуры в поверхностном слое деталей КС железоникелевыми термоприемниками специальной конструкции [1]. Расположение термоприемников и термопар в крышке цилиндров дизеля показано на рис. 1. Для измерения параметров рабочего процесса и локального радиационно-конвективного теплообмена использовался специальный контрольно-измерительный комплекс ранее представленный авторами в [2].

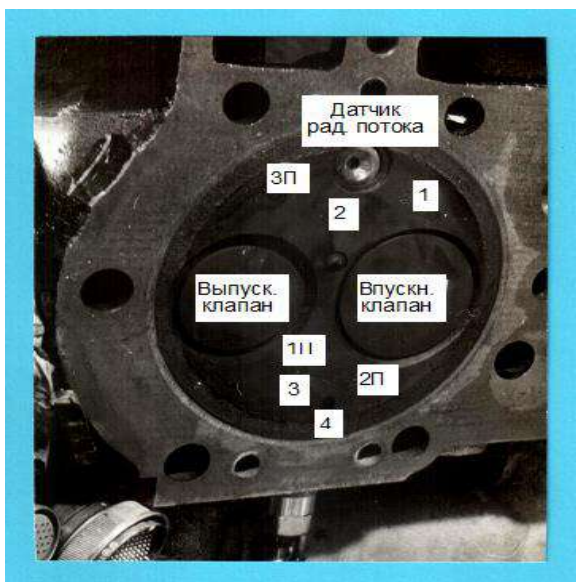


Рис. 1. Расположение термоприемников и термопар в крышке цилиндров дизеля

Значение плотности суммарного теплового потока определялось на базе известного решения дифференциального уравнения теплопроводности для твердого тела без внутренних источников теплоты с граничными условиями первого рода [1].

$$\frac{DT}{dt} = a\nabla^2 T, \tag{1}$$

где $\frac{DT}{dt}$ – полная производная от температуры T по

времени t , $\nabla^2 T$ – оператор Лапласа по температуре, a – коэффициент температуропроводности.

Для тонкого слоя стенки (толщина горячего сляя использованных в настоящем исследовании железоникелевых термоприемников составляла 20 – 25 мкм) с достаточной степенью точности можно считать тепловой поток одномерным [2, 3]. В этом случае уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \tag{2}$$

Полагая в (2) $a = \text{const}$, можно получить его решение. Наиболее просто интегрирование (2) осуществляется при граничных условиях первого рода $T = T(x, t)$. Решение при указанных граничных условиях известно [4 – 6] и выглядит следующим образом

$$T = T_w - \frac{q_w}{\lambda} x + \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(-x \sqrt{\frac{k\omega}{2a}}\right) \times \left[A_k \cos\left(k\omega t - x \sqrt{\frac{k\omega}{2a}}\right) + B_k \sin\left(k\omega t - x \sqrt{\frac{k\omega}{2a}}\right) \right], \tag{3}$$

где T_w – стационарная температура стенки; q_w – стационарный тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности; A_k, B_k – гармонические коэффициенты функции $T = T(x, t)$; k – порядок гармоники; ω – циклическая частота колебаний; x – расстояние от тепловоспринимающей поверхности. Продифференцировав (3) по x и умножив на $-\lambda$ и принимая $x=0$ (условие на поверхности стенки) получим уравнение (4), характеризующее теплообмен между рабочим телом и стенками КС

$$q = q_w + \lambda \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\frac{k\omega}{2a}} \times \left[(A_k + B_k) \cos k\omega t + (B_k - A_k) \sin k\omega t \right]. \tag{4}$$

Значения коэффициентов Фурье A_k и B_k в (4) определялись с помощью экспериментальной кривой колебаний температуры, записанной железоникелевым термоприемником [1]. При этом указанная кривая аппроксимируется рядом Фурье.

$$T = T_w + \sum_{k=1}^m (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t). \tag{5}$$

Вычисление коэффициентов A_k и B_k в (5) и расчет плотности теплового потока по зависимости (4) осуществляется по специальной программе на ЭВМ [1].

Параметры теплообмена измерялись на пяти режимах нагрузочной характеристики ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $P_{\text{ме}} = 0,12 : 0,36 : 0,49 : 0,61 \text{ МПа}$).

Колебания температуры и локальные тепловые потоки на поверхности крышки цилиндров

На рис. 2, представлены кривые колебаний температуры в четырех точках крышки цилиндра на режиме $P_{\text{ме}} = 0,61 \text{ МПа}$, $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Точки 1П, 2П, 3П и 4П расположены на расстоянии соответственно 30, 45, 53 и 57 мм от оси цилиндра. Величина колебания температуры в указанных точках составляет 14,2; 6,7; 4,8; 3,8 $^{\circ}\text{C}$. Наибольшая величина температурных колебаний зарегистрирована в точке 1П на режиме максимального крутящего момента 14,4 $^{\circ}\text{C}$. При этом в точке 2П, 3П и 4П колебания температуры соответственно равны 6,9; 6,5; 6,0 $^{\circ}\text{C}$. Максимальной величины температурные колебания при испытании двигателя по нагрузочной характеристике достигают в районе 23 – 30 $^{\circ}$ поворота коленчатого вала (ПКВ) после верхней мертвой точки (ВМТ).

Анализ осциллограмм температурных колебаний показывает, что характер протекания кривых $T = T(x, t)$ зависит от места установки термоприемника. Для термоприемника, расположенного в точке 1П, кривые $T = T(x, t)$ имеют крутой передний фронт и, как правило, острые вершины в месте своего максимума (18 – 20 $^{\circ}$ ПКВ после ВМТ). В то же время кривые

$T=T(x,t)$, полученные от термоприемников, расположенных дальше от оси цилиндра (за кромкой КС в поршне), имеют менее крутой передний фронт и достигает своего максимума в передачах 25 – 35°ПКВ после ВМТ.

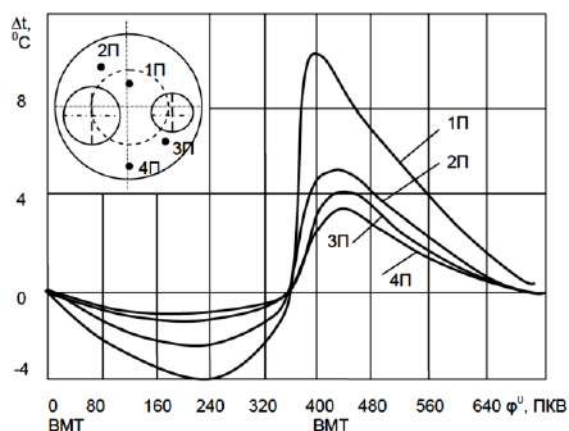


Рис. 2. Колебания температуры на поверхности крышки цилиндров

Учитывая, что динамические свойства термоприемников, обусловленные величиной эффективной глубины расположения горячего спая примерно одинаковы, (величина $x \approx 20$ мкм) снижение крутизны кривой $T=T(x,t)$, характер протекания ее в течение цикла и величину размаха колебаний в зависимости от места термоприемника можно объяснить различными условиями взаимодействия рабочего тела с отдельными участками тепловоспринимающей поверхности, температурными состояниями этих участков и их ориентацией относительно топливных факелов.

Изменение максимального размаха колебаний температуры от нагрузки показано на рис. 3.

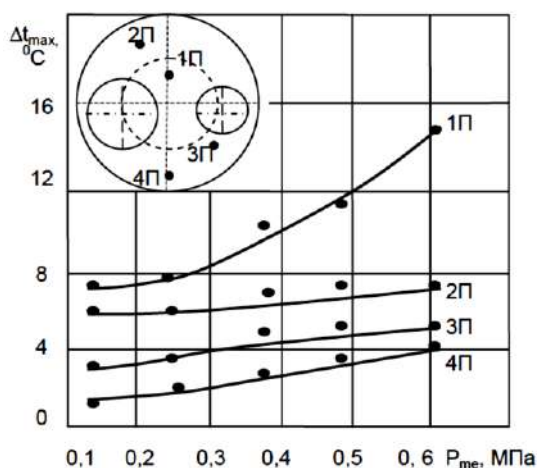


Рис. 3. Зависимость максимального размаха колебаний температуры на поверхности крышки цилиндров от нагрузки, $n=1700$ мин⁻¹

Из него видно, что интенсивность теплообмена возрастает с увеличением нагрузки во всех точках замера, однако темп роста в различных местах неодинаков. Наиболее сильное увеличение амплитуды колебаний температуры наблюдается в центральной части крышки, к периферии темп увеличения колебаний снижается. Такое различие

является следствием особенностей КС высокооборотных дизелей и влияния газодинамических факторов на интенсивность теплообмена и еще раз подтверждает необходимость учета локального характера распределения плотности теплового потока даже для одной поверхности [7 – 10]. Полученные в результате обработки осциллограмм на ЭВМ данные по локальным тепловым потокам в четырех точках поверхности крышки цилиндров при испытании дизеля по нагрузочной характеристике представлены на рис. 4.

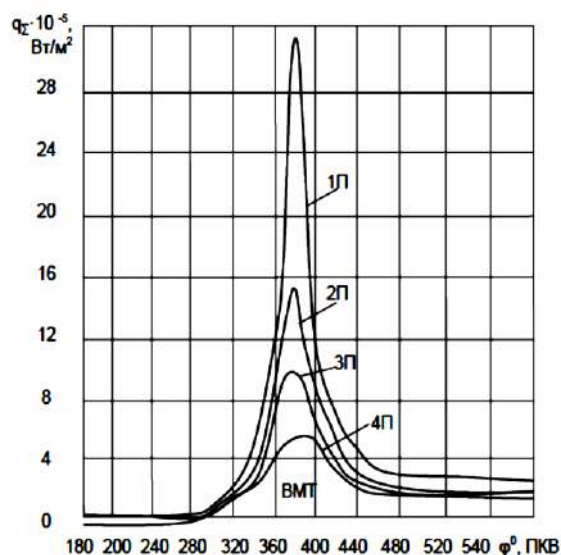


Рис. 4. Изменение плотности тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров $P_{me}=0,61$ МПа, $n=1700$ мин⁻¹

Анализ этих зависимостей позволяет отметить ряд особенностей протекания кривых $q_{\Sigma}=f(\varphi)$ в зависимости от места установки термоприемника и изменений нагрузки. Для точки 1П кривые $q_{\Sigma}=f(\varphi)$ имеют, как в $T=T(x,t)$ крутой передний фронт и достигают своего максимума в передачах 10 – 20°ПКВ после ВМТ, причем этот угол практически сохраняется независимо от величины нагрузки. Тепловой поток меняет свое направление в районе 260 – 280°ПКВ, максимальная плотность теплового потока, равна $29,5 \cdot 10^5$ Вт/м² и зарегистрирована в точке 1П на режиме $P_{me}=0,61$ МПа, $n=1700$ мин⁻¹.

С удалением от центра КС максимум плотности теплового потока быстро снижается и для указанного выше режима в точке 4П составляет $5,3 \cdot 10^5$ Вт/м². При этом кривые $q_{\Sigma}=f(\varphi)$ для периферийных точек имеют пологий передний фронт и достигают своего максимального значения в районе 30 – 40°ПКВ после ВМТ. Увеличение нагрузки от $P_{me}=0,12$ до 0,61 МПа вызывает рост плотности теплового потока для точки 1П от $13 \cdot 10^5$ до $29,5 \cdot 10^5$ Вт/м², в то же время для периферии крышки цилиндров (точка 4П) изменения составляют от $1,6 \cdot 10^5$ до $5,3 \cdot 10^5$ Вт/м².

Величина средних за цикл плотностей тепловых потоков определялись численным интегрированием $q_{\Sigma}=f(\varphi)$. Их изменение в функции радиуса цилиндра при испытании по нагрузочной характеристике показано на рис. 5.

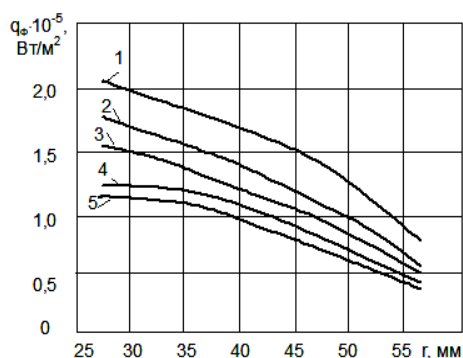


Рис. 5. Изменение средней за цикл плотности теплового потока на поверхности крышки цилиндров в функции радиуса цилиндра:

1 – $P_{me}=0,61$ МПа, 2 – $P_{me}=0,49$ МПа, 3 – $P_{me}=0,36$ МПа,
4 – $P_{me}=0,24$ МПа, 5 – $P_{me}=0,12$ МПа

Из него видно, что наблюдается снижение значений $q_{ср}$ от центра крышки к периферии. Максимальная величина средней за цикл плотности теплового потока соответствует точке 1П и равняется на режиме $P_{me}=0,61$ МПа, $n=1700$ мин⁻¹, $q_{ср} \approx 2,1 \cdot 10^5$ Вт/м².

Анализируя полученные в данной работе опытные данные по радиационному теплообмену, необходимо отметить следующее. Величина радиационного теплового потока является сугубо локальной. Это объясняется двумя факторами.

Во-первых, датчик радиационного теплового потока устанавливается в каком-то определенном месте КС и во-вторых, датчик имеет определенный «угол зрения» (величину угла, отсекаемого отверстием диафрагмы). В этих условиях, учитывая различное расположение факелов топлива в КС скоростей движения газов относительно каждой из тепловоспринимающих поверхностей, различие их степеней черноты и температуры (последние два фактора определяют собственное излучение поверхностей, образующих полость КС) нельзя рассчитывать на одинаковую плотность радиационного теплового потока по отношению к

каждой из поверхностей и даже отдельных участков конкретной тепловоспринимающей поверхности.

В случае использования в опытах одного датчика радиационного теплового потока можно констатировать экспериментально определенное отношение q_l/q_{Σ} , справедливое лишь для данной поверхности, где был вначале установлен датчик, а затем обычный поверхностный термоприемник. Предложение о том, что величина $q_{лср}/q_{ср}$ или $q_{лmax}/q_{\Sigma max}$ остается примерно одинаковой для всех точек, исследуемой поверхности теплообмена, не является обоснованным [8,9,11,12].

В настоящей работе результаты по радиационному тепловому потоку получены с помощью специального датчика [1], расположенного в точке 4П крышки цилиндра (см. рис. 1, позиция «датчик рад. потока»). Амплитуда колебаний температуры, зафиксированная этим датчиком на режиме $P_{me}=0,61$ МПа, $n=1700$ мин⁻¹, составляет 0,6°С. Максимум плотности радиационного теплового потока равен $2,2 \cdot 10^5$ Вт/м² и располагается в районе 30° ПКВ после ВМТ. Продолжительность радиационного теплообмена по углу ПКВ составляет около 90°, причем с уменьшением нагрузки она сокращается до 75 – 80° ПКВ. Отношение $q_{лmax}/q_{\Sigma max}$ практически одинаково на всех исследованных режимах и составляет $\approx 0,4$.

Заключение

Представленные в статье результаты экспериментального исследования теплообмена между рабочим телом и огневой поверхностью крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14 весьма существенно дополняют банк данных по локальным тепловым потокам в деталях, образующих КС. Это значительно расширяет возможности конструкторов и исследователей современных судовых формованных дизелей в процессе верификации новых математических моделей и позволяет уже на стадии проектирования выполнить количественную оценку теплового и НДС деталей цилиндропоршневой группы, а также сделать прогноз их эксплуатационной надежности.

Литература

1. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
2. Руднев Б.И., Поваляхина О.В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2022, №2, Часть 1, С. 73 – 78.
3. Овсянников М.К., Давыдов Г.А. Тепловая напряженность судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1975, 256с.
4. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 512 с.
5. Бузник В.М. Теплопередача в судовых энергетических установках. Л.: Судостроение, 1967, 376 с.
6. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472 с.
7. Dent J.C., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26 p.
8. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York. Academic Press, 2003, 822 p.
9. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975, 934 с.
10. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 85 с.
11. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях. М.: Машиностроение, 1977, 216 с.
12. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Spectral characteristics of flame in the combustion chamber of the diesel engine // Materials of the International Conference "Scientific research of the SOC countries: synergy and integration" = Reports in English. Part 2. Beijing, China 2019. P. 160 – 167.

References

1. Rudnev B.I. Protsessy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelej [Processes local heat transfer in diesels combustion chamber] // Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
2. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Kontrol'no-izmeritel'nyj kompleks dlya issledovaniya parametrov rabocheho protsessa i radiatsionno-konvektivnogo teploobmena v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Control measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in combustion chamber of a marine high speed diesel engine] // Morskije intellektual'nye tekhnologii, 2022, №2, CHast' 1, S. 73 – 78.
3. Ovsyannikov M.K., Davydov G.A. Teplovaya napryazhennost' sudovykh dizelej [Thermal density marine of diesels] // L.: Sudostroenie, 1975, 256s.
4. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. Matematicheskie modeli mekhaniki i ehlektrodinamiki sploshnoj sredy [Mathematical models of mechanics and electric dynamic] // M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2008, 512 s.
5. Buznik V.M. Teploperedacha v sudovykh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Heat transfer in ship power of plants] // L.: Sudostroenie, 1967, 376 s.
6. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh [Local heat transfer in piston of engines] // M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2007, 472 s.
7. Dent J.C., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints, 1977, № 770407, 26 p.
8. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York. Academic Press, 2003, 822 p.
9. Zigel' R., KHauehll Dzh. Teploobmen izlucheniem [Radiative heat transfer] // M.: Mir, 1975, 934 s.
10. Kavtaradze R.Z., Onishhenko D.O., Zelentsov A.A. Trekhmernoe modelirovanie nestatsionarnykh teplofizicheskikh protsessov v porshnevnykh dvigatelyakh [Three dimension modeling non-stationary heat-physical of processes in piston of engines] // M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2012, 85 s.
11. Rozenblit G.B. Teploperedacha v dizelyakh [Heat transfer in diesels] // M.: Mashinostroenie, 1977, 216 s.
12. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Spectral characteristics of flame in the combustion chamber of the diesel engine //Materials of the International Conference "Scientific research of the SOC countries: synergy and integration" = Reports in English. Part 2. Beijing, China 2019. P. 160 – 167.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.034>

Оценка изменения технического состояния механических демпферов крутильных колебаний дизелей 8МАК25 в зависимости от наработки

М.Н. Покусаев¹ evt2006@rambler.ru, К.О. Сибряев¹ evt2006@rambler.ru,
М.М. Горбачев¹ max9999_9@mail.ru, А.Д. Ибадуллаев¹ adel.ibadullaev99@mail.ru

¹Астраханский государственный технический университет

Аннотация. Оценка технического состояния пружинных демпферов крутильных колебаний судовых дизелей на сегодня производится при помощи частичной их разборки и замеров зазоров между его элементами. Однако, такая процедура требует привлечения специалистов зарубежных фирм производителей демпферов, что в условиях политических и экономических санкций становится затруднительно. Методика безразборной оценки технического состояния пружинных демпферов не разработана и не одобрена классификационными обществами, что делает тему исследования актуальной. В статье рассматриваются результаты экспериментальной оценки изменения работоспособности демпферов дизелей 8МАК25 в зависимости от их наработки. Результаты, полученные по итогам тorsiографирования валопровода судна «Лангепас» в период с 2019 по 2022 г., позволяют говорить о возможности оценки скорости деградации пружинных демпферов и роста касательных напряжений. Результаты проведенных исследований показывают четкую зависимость роста касательных напряжений в элементах судового валопровода при увеличении наработки демпферов крутильных колебаний. Их рост количественно оценен авторами статьи и приведен в результатах работы и выводах.

Ключевые слова: крутильные колебания, механический демпфер, судовой машинно-двигательный комплекс, судно обеспечение, судовая энергетическая установка.

Для цитирования: Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Оценка изменения технического состояния механических демпферов крутильных колебаний дизелей 8МАК25 в зависимости от наработки, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 128—134.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.034>

Assessment of changes in the technical condition of mechanical dampers of torsional vibrations of diesel engines 8MAK25 depending on the operating time

Mikhail N. Pokusaev¹ evt2006@rambler.ru, Konstantin O. Sibrayev¹ evt2006@rambler.ru,
Maksim M. Gorbachev¹ max9999_9@mail.ru, Adel D. Ibadullaev¹ adel.ibadullaev99@mail.ru

¹Astrakhan state technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The assessment of the technical condition of the spring dampers of torsional vibrations of marine diesel engines today is carried out by means of their partial disassembly and measurements of the gaps between its elements. However, such a procedure requires the involvement of specialists from foreign manufacturers of dampers, which becomes difficult in the conditions of political and economic sanctions. The method of non-selective assessment of the technical condition of spring dampers has not been developed and has not been approved by classification societies, which makes the research topic relevant. The article discusses the results of an experimental assessment of changes in the performance of dampers of diesel engines 8MAK25 depending on their operating time. The results obtained from the results of the torsiography of the Langepas vessel's shaft line in the period from 2019 to 2022 allow us to talk about the possibility of assessing the degradation rate of spring dampers and the growth of tangential stresses. The results of the conducted studies show a clear dependence of the growth of tangential stresses in the elements of the ship's shaft line with an increase in the operating time of torsional vibration dampers. Their growth is quantified by the authors of the article and is given in the results of the work and conclusions.

Keywords: torsional vibrations, mechanical damper, ship engine and propulsion system, ship support, ship power plant.

For citation: Mikhail N. Pokusaev, Konstantin O. Sibrayev, Maksim M. Gorbachev, Adel D. Ibadullaev, Assessment of changes in the technical condition of mechanical dampers of torsional vibrations of diesel engines 8MAK25 depending on the operating time, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 128—134.

Введение

Крутильные колебания остаются опасными динамическими явлениями, которые возникают в энергетических установках различного назначения на базе двигателей внутреннего сгорания и турбин. Согласно ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004 [1] крутильные колебания определяются как: «...колебательные

угловые деформации (скручивание) валопровода при вращении...». В судовых энергетических установках опасность крутильных колебаний, развивающихся в машинно-двигательных комплексах (МДК), находится под контролем классификационных обществ. В правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС), Российского классификационного общества (РКО) и

зарубежных обществ, входящих в ассоциацию МАКО, содержатся требования к расчетам и измерениям крутильных колебаний, а также, допустимые нормы касательных напряжений в валах судовых МДК, эластичных моментов в редукторах, упругих муфтах и т.д. Традиционно для снижения величины крутильных колебаний в энергетических установках различного назначения применяются демпферы и антивибраторы. Демпферы делятся на несколько групп, включая – жидкостные, трения, механические и другие. К механическим демпферам относятся и комбинированные (сочетающие в себе как механические демпфирующие элементы – рессорные или цилиндрические пружины, так и гидравлический наполнитель – смазочное масло). Масло в данном случае играет роль как жидкостного наполнителя, так и охлаждающей среды. В судовых энергетических установках с четырехтактными среднеоборотными дизелями с прямой или редукторной передачей на гребной винт фиксированного шага применяются силиконовые демпферы. Для современных судов со сложными схемами МДК – с дизелями повышенной оборотности, упругими муфтами, винто-рулевыми колонками и другими элементами используются комбинированные демпферы с механическими пружинами и гидравлическим наполнителем в виде масла, поступающего под давлением из системы смазки дизеля. Механические антивибраторы применяются в тепловозных энергетических установках. Демпфер крутильных колебаний, как любое механическое устройство, имеет предельный срок службы и в ходе эксплуатации постепенно теряет свою эффективность. По данным фирм производителей «Holset» [2], «STE» [3], «Hasse & Wrede» [4], «Geislinger» [5] средний срок службы демпферов составляет 90000 часов работы. Техническое состояние и остаточный ресурс для силиконовых демпферов может оцениваться несколькими способами, в основном это осуществляется по итогам контрольных торсиографирований – измерений крутильных колебаний. Данный метод подразумевает использование методики безразборной оценки остаточного ресурса демпфера, которая одобрена РМРС и РКО и не требует демонтажа и вскрытия силиконового демпфера. Техническое состояние механических демпферов безразборным методом не оценивают, поскольку одобренной классификационными обществами методики для такой процедуры в настоящее время нет. Поэтому, для механического демпфера необходим демонтаж, частичная разборка конструкции и измерение зазоров в пружинных пакетах [6]. Зачастую подобная процедура весьма сложна из-за необходимости привлечения зарубежных специалистов фирм производителей демпферов, что в условиях санкций и политических ограничений не всегда возможно. В связи с этим, разработка методики безразборной оценки технического состояния и назначения остаточного ресурса механических демпферов является актуальной и необходимой темой исследования, в том числе, для приобретения технологического суверенитета в данной области.

Постановка задачи исследования

Одним из первых этапов разработки вышеуказанной методики является сбор достаточного объема статистических материалов практических измерений на судах с установленными механическими демпферами. Авторы статьи являются специалистами испытательного центра «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (ИЦ «MTS»), который осуществляет торсиографирование судов с 2001 года и накопили большой практический опыт периодических измерений крутильных колебаний судовых МДК. Некоторые суда торсиографировались ИЦ «MTS» несколько раз с периодичностью в несколько лет. Это позволило получить уникальные результаты по динамике изменения параметров крутильных колебаний в зависимости от наработки демпферов. В данном исследовании была поставлена задача провести анализ результатов торсиографирований МДК судна обеспечения «Лангепас», осуществленных в 2019, 2020 и 2022 году. Такие короткие промежутки между испытаниями объясняются интенсивной эксплуатацией судна обеспечения буровых платформ и выработкой назначенного ресурса между проверками демпфера в 10000 - 12000 часов за один-два года. Полученные результаты позволяют судить о степени развития касательных напряжений при деградации механического демпфера в зависимости от его наработки.

Материалы и методы

В качестве главных двигателей на судах типа «Лангепас» применяются дизели 8МАК25 с механическими демпферами крутильных колебаний с цилиндрическими пружинами и гидравлическим наполнителем в виде смазочного масла, подаваемого под давлением. Оффшорное судно «Лангепас» имеет большое количество функций – судно обеспечения, спасатель, буксир, пожарное судно, поэтому его МДК имеет сложную схему и в его состав входят: пожарный насос, мультипликатор для его привода, нескольких упругих муфт, валогенератор, редуктор для отбора мощности на валогенератор и винт регулируемого шага. Это приводит к возникновению 9-и опасных форм свободных крутильных колебаний, частота которых входит в рабочий диапазон частоты вращения главного двигателя 8МАК25 (от 450 до 750 об/мин). Помимо моторных форм возникает и несколько опасных валопроводных форм крутильных колебаний, что не дает гарантии эффективной работы силиконового или антивибратора, а применение механического демпфера с гидравлическим наполнителем позволяет получить эффективное демпфирование в широком диапазоне частот колебаний. Согласно инструкции по эксплуатации дизеля 8МАК25 [7], проверка технического состояния демпфера крутильных колебаний производится через каждые 12000 часов работы. Замена разборной диагностики демпферов торсиографированием для оценки их технического состояния была официально разрешена как РМРС, так и производителем дизелей, что говорит о легитимности проведенных измерений.

Торсиографирование (а точнее – тензометрирование) проводилось при помощи измерительного комплекса «Астеч Электроникс» (Великобритания) с датчиком в виде тензометрического моста на базе тензорезисторов 2ФПК5-400 (производства «Сибтензоприбор», Россия). Тензодатчики были установлены на доступном для монтажа участке промежуточного вала после редуктора. Необходимо отметить, что при приемо-сдаточных испытаниях в 2009 году измерение крутящего момента главной энергетической установки судна «Лангепас» производилось также тензометрированием на данном участке вала программно-аппаратным комплексом «Denbar Industries Radio Telemetry». Тарировка тензодатчиков проводилась на тарировочной балке СМ-25 с калибровочными грузами. Измерения производились на ходовых испытаниях судна, в соответствии с программой,

согласованной РМРС с учетом требований правил РМРС [8, 9], ГОСТ 26046-83 [10]. Параметры окружающей среды и состояние акватории соответствовали правилам РМРС к метеорологическим условиям испытаний.

Результаты

Наиболее опасным режимом с точки зрения развития крутильных колебаний в МДК судна «Лангепас» является использование пожарных насосов и гребного винта регулируемого шага при движении судна. Это приводит к возникновению наиболее опасных резонансов 5-ти узловой формы на частоте вращения коленчатого вала дизеля 475 об/мин, (при частоте свободных колебаний 1668 кол/мин). Крутильная схема и 5-ти узловая форма колебаний согласно проведенного авторами расчета представлена на рис. 1.

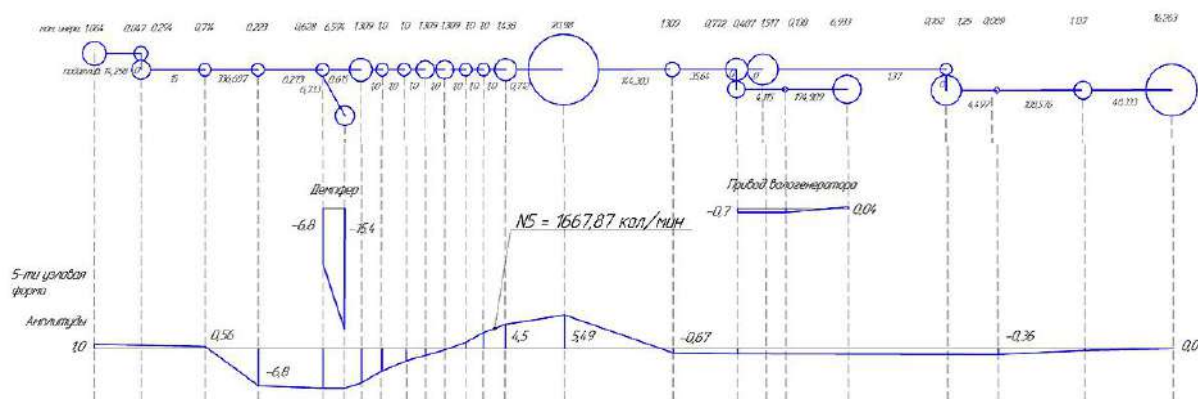


Рис. 1. Крутильная схема и 5-ти узловая форма резонансных крутильных колебаний МДК судна «Лангепас»: (на крутильной схеме кругами обозначены безразмерные моменты инерции сосредоточенных масс, линиями между кругами обозначены податливости соединений масс – валы, муфты, демпфер)

В табл. 1 приводятся результаты торсиографирования, проведенного в 2019, 2020, 2022 гг. с величиной суммарных касательных

напряжений в коленчатом валу дизеля на частоте вращения 475 об/мин.

Таблица 1

Результаты периодического торсиографирования МДК судна обеспечения «Лангепас»

Полная схема МДК с приводом пожарного насоса, гребного винта и валогенератора (без нагрузки)										
Год	Наработка ГД, моточасы		Форма колебаний	Порядок колебаний	Частота вращения коленчатого вала, об/мин	Касательные напряжения, МПа		Допуст. касательные напряжения, МПа	Уровень от допустимых касательных напряжений согласно правил РМРС, (%)	
	Правый борт	Левый борт				Прав. борт	Лев. борт		Прав. борт	Лев. борт
2019	62880	63000	5-ти узловая	3,5	475	26,981	26,431	36,7	73,5	72,0
2020	72414	72657				30,469	29,092		83,0	79,3
2022	84417	84587				31,019	32,396		84,5	88,3

Пример полученной торсиограммы на частоте вращения 475 об/мин приведен на рис. 2, а на рис. 3 представлен результат гармонического анализа

функции крутильных колебаний, полученной в программном продукте разработки авторов [11].

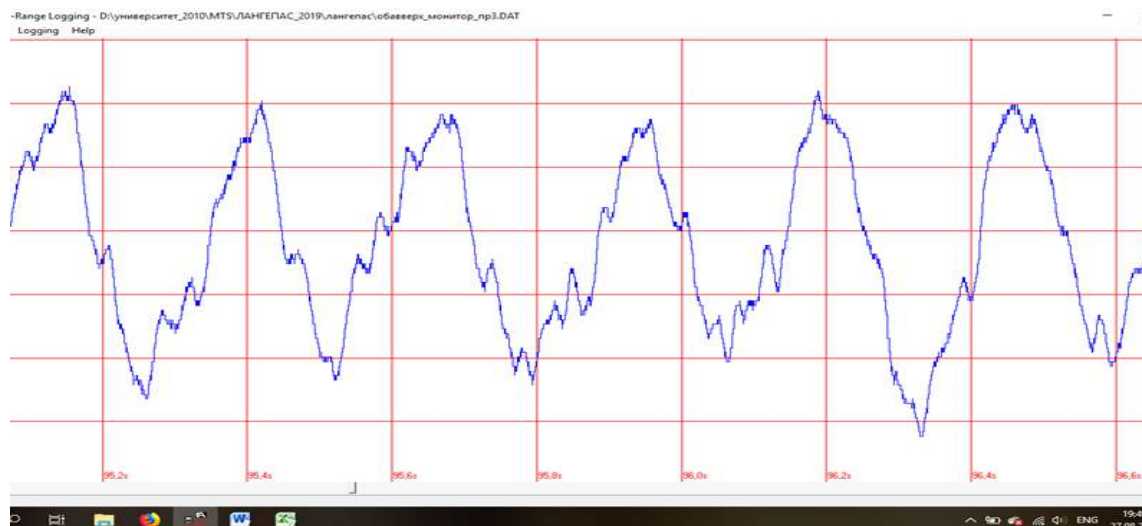


Рис. 2. Торсиограмма МДК двигателя правого борта на режиме 475 об/мин

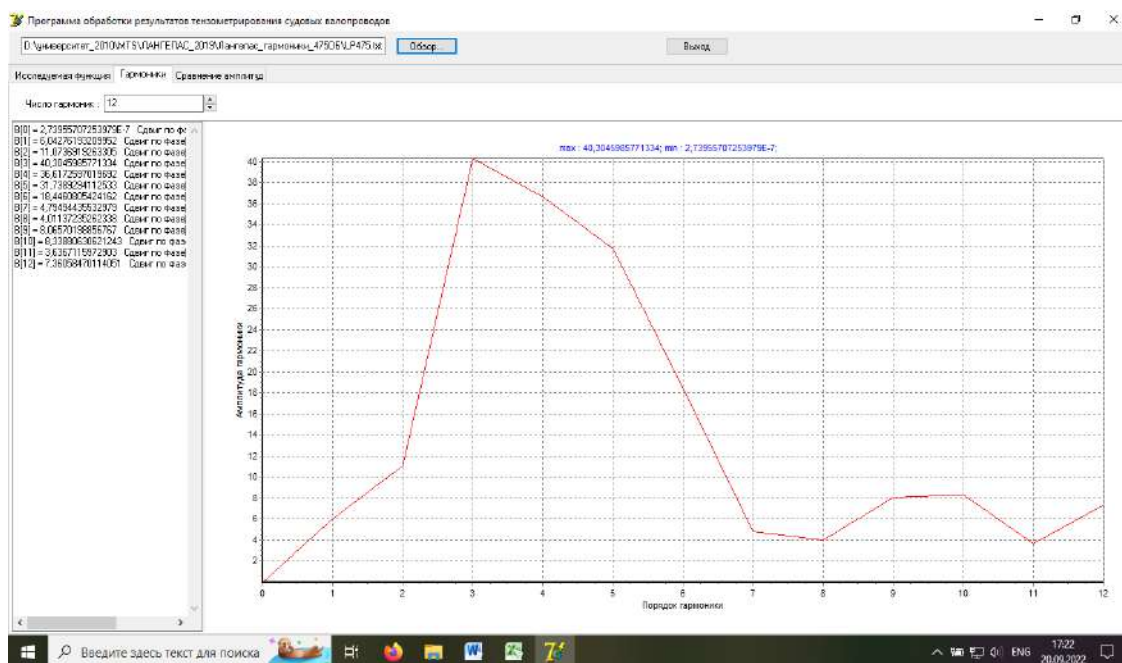


Рис. 3. Результаты гармонического анализа торсиограммы

Как видно из рис. 3, наиболее выраженными гармониками являются 3 и 4, включая и гармонику 3.5. В качестве граничного критерия работоспособности демпферов в табл. 1 было использовано требование РМРС [9], согласно которому демпфер (силиконовый или механический) должен эффективно снижать уровень касательных напряжений до 85% от допустимых значений.

Обсуждение

Согласно результатам проведенных исследований была получена относительная скорость роста касательных напряжений на опасном резонансном режиме, которая в среднем составляет 0,187 – 0,276 МПа на каждую 1000 часов наработки сверх 60000 часов. Из таблицы 1 четко виден рост касательных напряжений, но не имеющий линейную зависимость от времени. Однако, экспериментальное подтверждение роста

касательных напряжений доказывает правильность использования данного параметра в качестве одного из критериев деградации демпферов и его возможности использования при разработке методики безразборной диагностики технического состояния механических демпферов.

Следует однако, признать необходимость периодической разборки демпферов для проверки износа пружинных пакетов или их повреждения, поскольку это позволяет исключить рост опасных амплитуд крутильных колебаний. Для удобства судовладельца возможен компромиссный вариант – при полном ресурсе демпфера 90000 часов и гарантийном сроке работы 30000 часов, первую проверку при наработке 42000 часов производить торсиографированием, далее при наработке 54000 часов производить разборную диагностику и при необходимости ремонт пружинных пакетов, далее при наработке 66000 часов производить

торсиографирование, далее при достижении 78000 часов производить контрольную разборку и при допуске демпфера до очередного эксплуатационного периода заканчивать эксплуатацию на сроке 90000 часов наработки с дальнейшей заменой демпфера. Также, согласно данных завода производителя дизелей МАК, рекомендуется производить торсиографирование в начале эксплуатации дизеля, при его условной нулевой наработке, это позволит получить необходимые данные по касательным напряжениям при первоначальном техническом состоянии демпфера.

Если описанный выше метод периодического безразборного и разборного контроля технического состояния механического демпфера можно отнести к диагностике «по регламенту», то возможна и альтернатива – «оценка по состоянию». В данном случае, можно использовать систему мониторинга крутильных колебаний, которая позволит осуществлять постоянный контроль за динамикой

развития касательных напряжений в элементах судового МДК. Подобное техническое решение предлагает фирма «Geislinger» с измерением амплитуды крутильных колебаний непосредственно на демпфере их производства, которое реализовано соответственно с помощью системы TVS серии MARK [12]. В ФГБОУ ВО «АГТУ» при реализации гранта «СТАРТ-1» «Фонда содействия инновациям» совместно с ООО «МИТ» (г. Астрахань) [13] был разработан собственный прототип подобной системы и испытан в период с 18.04.2022 по 20.05.2022 г. на бункеровщике «Иван Поддубный». На данном судне в качестве главного двигателя установлен дизель MAN B&W 8L27/38 VO с пружинным демпфером крутильных колебаний. На рис. 4 приведен пример торсиограммы, полученной в течении 130 мин. работы, в начале и конце торсиограммы четко видны рост крутильных колебаний при пуске и остановке МДК.

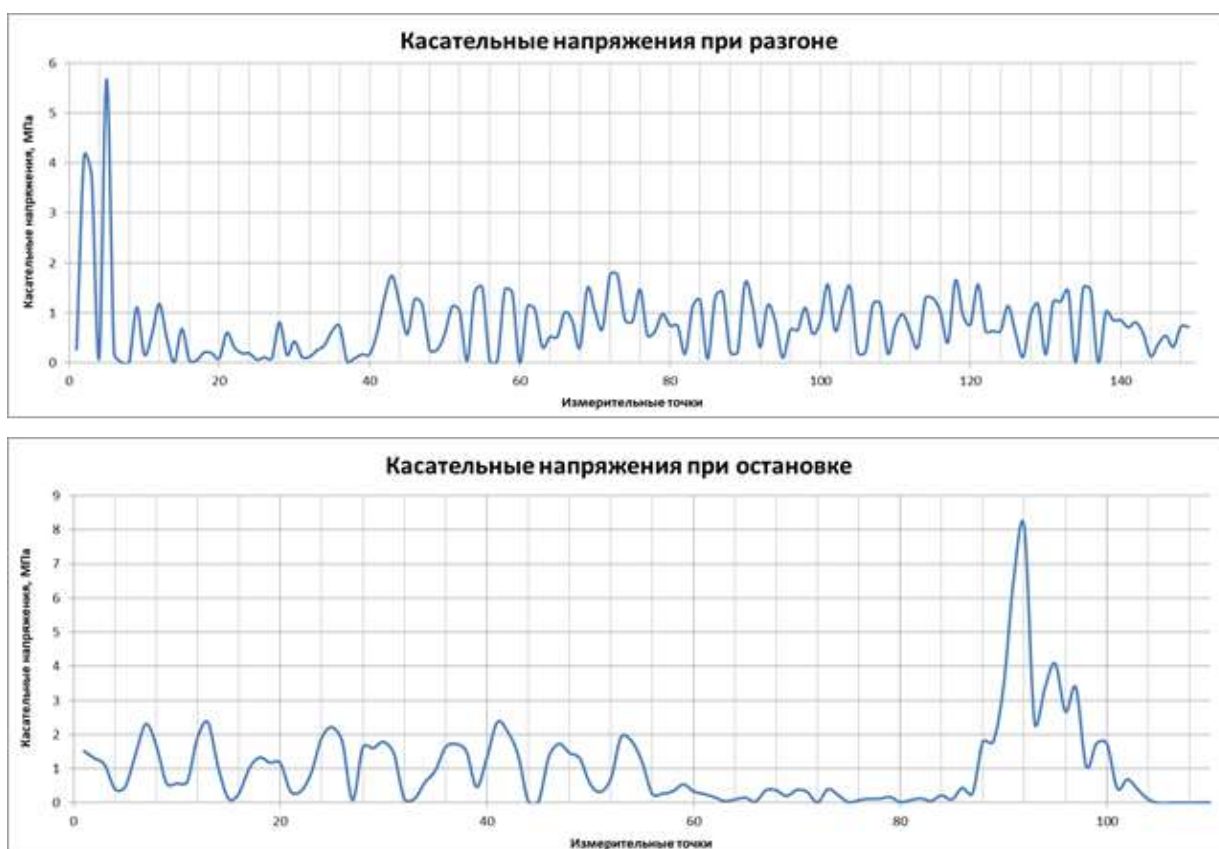


Рис. 4. Пример торсиограммы МДК судна «Иван Поддубный», полученной системой мониторинга разработки ООО «МИТ» (г. Астрахань)

Результаты позволяют говорить о возможности оценки динамики изменения крутильных колебаний в постоянном режиме, что гарантирует снижение риска возникновения аварийных ситуаций в период между проверками технического состояния демпфера.

Почему внедрение безразборной оценки и систем мониторинга будет выгодно судовладельцам в России можно пояснить следующими размышлениями. По опыту работы ИЦ «MTS» процедура подготовки измерительного тензометрического комплекса на судне составляет 2 часа для двухвальной установки, процедура торсиографирования занимает также до 2-х часов, то

есть, в общем, не более 4 часов. Процедура демонтажа, разборной оценки технического состояния и монтажа демпфера может составлять 8 - 10 часов, а стоимость всей диагностики в несколько раз выше (учитывая командировочные расходы специалистов зарубежной фирмы производителя демпфера), чем процедура торсиографирования. Торсиографированием в России занимается несколько специализированных фирм, включая ИЦ «MTS» (г. Астрахань), АО «РЦПКБ «Стапель» (г. Ростов), ООО «Астра-НН» (г. Нижний Новгород) и другие, их региональное расположение позволяет судовладельцам пользоваться наиболее близкими к

ним фирмами, что также снижает финансовые издержки.

Назначение же остаточного ресурса механических демпферов – это задача еще более сложная, которая требует не только накопления статистики измерений на судах, но и проведения расчетного и физического моделирования в лабораторных условиях, определения критериев, зависящих от крутильных колебаний, например: касательные напряжения, вибрации, температура и их изменение в зависимости от степени износа и повреждения пружинных элементов демпфера.

Заключение, выводы:

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При деградации демпферов их эффективность снижается, что подтверждается исследованиями авторов и рядом специалистов в области крутильных колебаний.

2. Средний рост касательных напряжений после наработки 60000 часов составляет 0,187 – 0,276 МПа на каждые 1000 часов наработки.

3. Разработка методики безразборной диагностики технического состояния механических демпферов крутильных колебаний судовых дизелей позволит снизить зависимость судовладельцев от зарубежных специалистов и процедуры демонтажа, разборки, дефектации и ремонта демпферов. Это также позволит снизить экономические затраты судовладельцев, так как процедура торсиографирования в несколько раз ниже, чем разборная диагностика механического демпфера.

4. Применение систем мониторинга крутильных колебаний позволит осуществлять контроль их развития и оценивать деградацию демпферов в постоянном режиме по методу технической диагностики «по состоянию».

Литература

- ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 5. Крутильные колебания. М.: ИПК издательство стандартов. 2004. – 7 с.
- Metaldyne Viscous Dampers. Formerly Simpson. Holset Viscous Damper, 2014. – 4 s.
- STE Schwingungstechnik. Maintenance Instruction for Viscous Torsional Vibration Dampers (VTD), 1996. –6 s.
- Viscous dampfer. Instruction manual. Hasse & Wrede. Mohriner, 1997. – 13 s.
- Geislinger. Damper Catalog. Version 15.9, 2020. – 50 s.
- Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. - СПб.: Наука, 2007. - 276 с.
- МАК М25. General-Engine operating instructions. Type M25, 1999. – 1966 s.
- Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД №2-020101-152. СПб, 2022. – 115 с. (электронное издание).
- Российский морской регистр судоходства. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009. СПб, 2022. – 411 с.
- ГОСТ 26046-83. Установки судовые. Общие требования к испытаниям на крутильные колебания (дата последнего изменения 13.07.2017 г.). М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 14 с.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа обработки результатов торсиографирования судовых валопроводов. М.М. Горбачев, А.Н. Глухов, А.С. Каден. – № 2016617759 ; заявл. 25.05.2016 ; опубл. 14.07.2016 г.
- Geislinger Monitoring. Monitoring Catalog. Version 5.4, Austria, 2018 – 30 s.
- Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М. Проектирование и разработка системы мониторинга крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов. В сборнике: 65-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета. материалы конференции. Астрахань, 2021. С. 819-821.

References

- GOST R ISO 3046-5-2004. Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevye. Harakteristiki. Chast' 5. Krutil'nye kolebanija [Internal combustion engines are reciprocating. Specifications. Part 5. Torsional vibrations]. M.: IPK izdatel'stvo standartov. 2004. – 7 s.
- Metaldyne Viscous Dampers. Formerly Simpson. Holset Viscous Damper, 2014. – 4 s.
- STE Schwingungstechnik. Maintenance Instruction for Viscous Torsional Vibration Dampers (VTD), 1996. –6 s.
- Viscous dampfer. Instruction manual. Hasse & Wrede. Mohriner, 1997. – 13 s.
- Geislinger. Damper Catalog. Version 15.9, 2020. – 50 s.
- Efremov L.V. Teorija i praktika issledovanij krutil'nyh kolebanij silovyh ustanovok s primeneniem komp'juternyh tehnologij [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technology]. SPb.: Nauka, 2007. - 276 s.
- МАК М25. General-Engine operating instructions. Type M25, 1999. – 1966 s.
- Rossijskij morskij registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Chast' VII. Mehanicheskie ustanovki [Russian Maritime Register of Shipping. Rules of classification and construction of sea vessels. Part VII. Mechanical installations]. ND №2-020101-152. SPb, 2022. – 115 s. (jelektronnoe izdanie).
- Rossijskij morskij registr sudohodstva. Prilozhenija k rukovodstvu po tehničeskomu nabljudeniju za sudami v jekspluatacii [Russian Maritime Register of Shipping. Appendices to the manual on technical supervision of vessels in operation]. ND № 2-030101-009. SPb, 2022. – 411 s.
- ГОСТ 26046-83. Установки судовые. Обshhie trebovanija k ispytanijam na krutil'nye kolebanija [Ship installations. General requirements for torsional vibration tests] (data poslednego izmenenija 13.07.2017 g.). M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam, 1983. – 14 с.

11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM. Programma obrabotki rezul'tatov torsiofirovaniya sudovyh valoprovodov. M.M. Gorbachev, A.N. Gluhov, A.S. Kaden [Certificate of state registration of a computer program. A program for processing the results of torsiongraphy of ship shaft pipelines]. – № 2016617759 ; zjavl. 25.05.2016 ; opubl. 14.07.2016 g.
12. Geislinger Monitoring. Monitoring Catalog. Version 5.4, Austria, 2018 – 30 s.
13. Pokusaev M.N., Sibryaev K.O., Gorbachev M.M. Proektirovanie i razrabotka sistemy monitoringa krutil'nyh kolebanij sudovyh mashinno-dvizhitel'nyh kompleksov [Design and development of a system for monitoring torsional vibrations of marine propulsion systems]. V sbornike: 65-ja Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. materialy konferencii. Astrahan', 2021. S. 819-821.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Николаевич Покусаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: evt2006@rambler.ru

Mikhail N. Pokusaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: evt2006@rambler.ru

Константин Олегович Сибряев, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; e-mail: evt2006@rambler.ru

Konstantin O. Sibrayev, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: evt2006@rambler.ru

Максим Михайлович Горбачев, кандидат технических наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

Maksim M. Gorbachev, Ph.D. (Eng), Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: max9999_9@mail.ru

Адель Дамирович Ибадуллаев, аспирант, ассистент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: adel.ibadullaev99@mail.ru

Adel D. Ibadullaev, graduate student, Assistant of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: adel.ibadullaev99@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 08.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 18.10.2022.

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

Научная статья

УДК 629.123

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.035>

Повышение вероятности безотказной работы системы «человек-машина» при внедрении системы мониторинга для оператора МАНС

А.В. Гринек¹ grinyokann@gmail.com, И.П. Бойчук¹ boychuk@ieee.org, С.А. Лицкевич¹ lion_novoross@mail.ru,
О.Н. Лицкевич¹ olga28.a@mail.ru, С.И. Кондратьев¹ mail@nsma.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье показан опыт разработки системы онлайн-мониторинга состояния автоматической идентификационной системы (АИС) и азиподов малого автономного судна. Подобная система может быть использована в совокупности с существующими и разрабатываемыми системами управления автономным судном с берега. Приведена схема сбора и хранения данных с транспондера АИС. Устройство реализует централизованное управление цепью питания прототипа, управление устройствами периферии и обеспечивает двустороннюю связь с оператором (для управления и считывания информации с датчиков).

Надежность работы элементов определяется надежностью датчиков и измерительной системы. Оценена интенсивность отказов линий передачи информации и блоков обработки сигналов. На основе принятых моделей рассчитана надежность системы «человек-машина», рассчитана надежность элементов в автоматической идентификационной системе малого автономного надводного судна. Сделан вывод о повышении надежности работы оператора. Разработано программное обеспечение и интерфейс для системы «оператор-судно». Разработанное техническое решение снижает нагрузку на оператора, и, следовательно, понижает вероятность аварийной ситуации.

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, безэкипажное судно, система «человек-машина», программное обеспечение, автоматизация, показатель надежности

Для цитирования: Гринек А.В., Бойчук И.П., Лицкевич С.А., Лицкевич О.Н., Кондратьев С.И. Повышение вероятности безотказной работы системы «человек-машина» при внедрении системы мониторинга для оператора МАНС. Интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 135—143.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.035>

Increasing the probability of failure-free operation of the man-machine system when implementing monitoring for the autonomous vessel operator

Anna V. Grinek¹ grinyokann@gmail.com, Igor P. Boychuk¹ boychuk@ieee.org,
Sergey A. Litskevich¹: lion_novoross@mail.ru, Olga N. Litskevich¹ olga28.a@mail.ru,
Sergey I. Kondratyev¹ mail@nsma.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The paper shows the experience of developing an online state monitoring system for the automatic identification system and azipods of a small autonomous ship. Such a system can be used in conjunction with existing and being developed systems for controlling an autonomous ship from the shore. A scheme for collecting and storing data from the automatic identification system transponder is given. The telemetry system is based on the ATmega2560 microprocessor device. The device implements centralized control of the prototype power supply circuit, controls peripheral devices and provides two-way communication with the operator (to control and read information from sensors). The reliability of the elements is determined by the reliability of the sensors and the measuring system. Failure rates of data transmission lines and signal processing units have been evaluated. On the basis of the adopted models, the reliability of the "man-machine" system is calculated, and the reliability of elements in the automatic identification system of a small autonomous surface ship is calculated. It is concluded that the reliability of the ship's operator has been improved. Software and interface for the operator-vessel system have been developed. The developed technical solution reduces the load on the operator, and, consequently, reduces the probability of an emergency situation.

Key words: automatic identification system, crewless vessel, "human-machine" system, software, automatization, reliability indicator

For citation: Anna V. Grinek, Igor P. Boychuk, Sergey A. Litskevich, Olga N. Litskevich, Sergey I. Kondratyev, Increasing the probability of failure-free operation of the man-machine system when implementing monitoring for the autonomous vessel operator, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 135—143.

Введение

Все большее распространение приобретает автоматическая информационная (идентификационная) система (АИС). АИС внедряют во все суда, и в будущем она станет основным компонентом международной морской информационной системы, обеспечивающей глобальный мониторинг морского флота. Параллельно с этим, развивается строительство малых автономных надводных судов (МАНС), которые в будущем займут свою нишу. В МАНС имеется возможность уменьшить количество членов экипажа, что позволит снизить вероятность ошибок по причине человеческого фактора, способствует удешевлению и оптимизации конструкции судна, т.к. исчезнет необходимость в помещениях, предназначенных под человеческие нужды.

Согласно 99-й сессии Комитета по безопасности на море (ИМО) [1-4] количество членов экипажа будет сокращаться, вплоть до полного исчезновения присутствия человека на судне, а слежение и помощь в управлении судном будет производиться оператором. Внедрение систем телеметрии на малых автономных судах ставит соответствующие задачи перед операторами подобных судов. Все это несет в себе проблему увеличения нагрузки на оператора, следовательно, необходимо решение, которое кроется в автоматизации различных процессов.

Система онлайн-мониторинга за элементами АИС и МАНС позволяет снизить вероятность аварийных ситуаций [5].

Целью работы является разработка и внедрение программного комплекса для оценки надежности функционирования элементов АИС и системы навигации и электродвижения МАНС.

1. Материалы

1.1. Геометрическая модель

Объектом исследования являлись: автоматическая идентификационная система и малое автономное надводное судно [6-10]. Трехмерные модели подобных судов могут быть использованы для инновационных методов изготовления МАНС. На рисунке 1 представлена разработанная трехмерная геометрическая модель малого автономного судна.

Система онлайн-мониторинга построена на базе микропроцессорного устройства ATmega2560 и реализует централизованное управление цепью питания прототипа, управление устройствами периферии и обеспечивает двустороннюю связь с оператором (для управления и считывания параметров системы).

Разработка данного проекта была обусловлена задачей централизованного управления судовым

рулевым механизмом с берега в полностью автоматическом режиме. Соответственно для обеспечения задачи автоматического управления необходимо организовать централизованную систему управления таким образом, чтобы она могла полностью заменить человека в большинстве стандартных ситуаций при навигации и эксплуатации судовых механизмов [11-13].

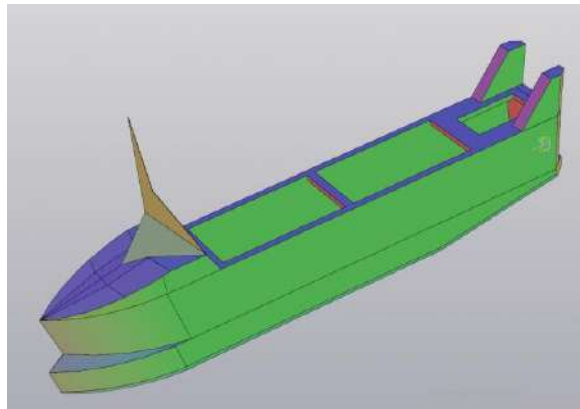


Рис. 9. Геометрическая модель МАНС

Центры управления базовыми станциями АИС, входящими в состав системы управления движением судов (СУДС) и региональной системы мониторинга, обеспечивают: управление движением судов в районе действия СУДС; мониторинг судоходства в зонах обслуживания; сбор судовых данных в базы данных центров; обмен судовыми данными с организациями, службами, частными лицами по сети Интернет; контроль правильности функционирования системы [14-18].

Основное преимущество центров управления работой АИС заключается в возможности полной автоматизации выполняемых функций.

Для работы программного обеспечения необходим аппаратный комплекс, позволяющий получать и передавать данные на устройство оператора. Таким комплексом выступает система удаленного сбора данных. Основой в такой системе являются датчики, которые крепятся к важным элементам и измеряют необходимый параметр. В судовой АИС выбраны блок питания и передатчик. Подключенные к ним датчики измеряют силу тока и выходную мощность соответственно. С аzipодов поступает информация об оборотах и мощности.

Общая схема системы удаленного сбора и обработки данных телеметрии представлена на рисунке 2. Данные о частоте вращения и состоянии АИС поступают в облачное хранилище, далее по существующим принятым моделям в программном алгоритме рассчитываются показатели надежности данного элемента и выводятся на панель оператора МАНС.

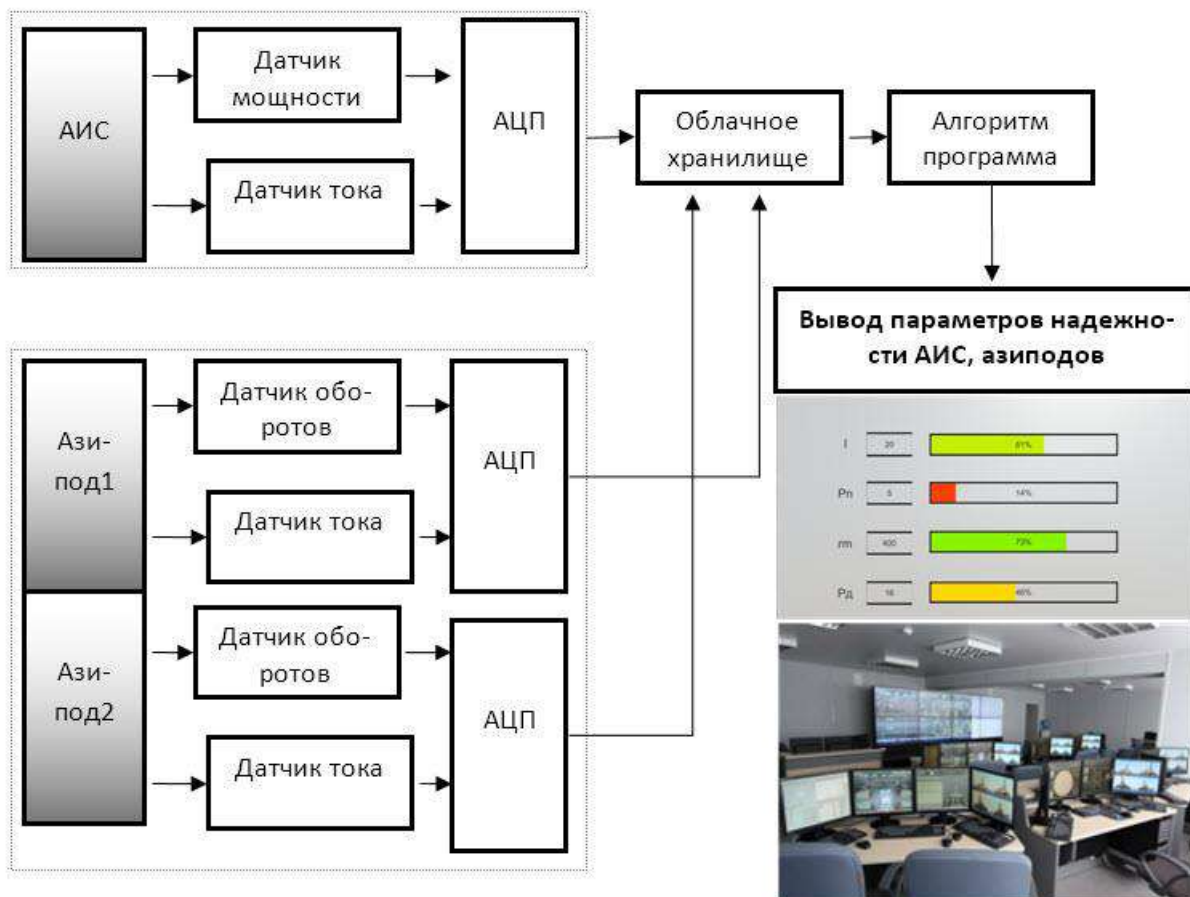


Рис. 2. Схема удаленного сбора и обработки информации для панели оператора МАНС

1.2. Система сбора, обработки и хранения информации АИС

Схема системы сбора и обработки данных для АИС изображена на рисунке 3. С блока питания и

передатчика поступает сигнал мощности и тока, преобразуется в цифровой формат и поступает через устройство связи на компьютер пользователя.

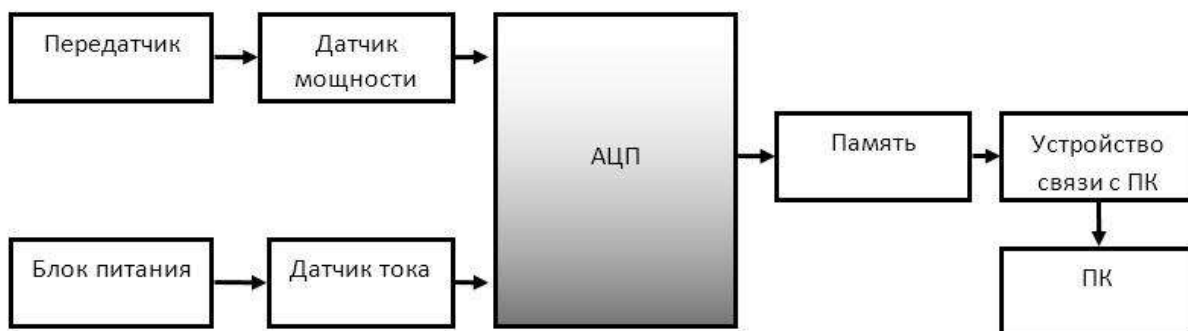


Рис. 10. Схема измерения, сбора и хранения данных с АИС

Устройство состоит из передатчика, блока питания, датчика мощности, датчика тока, аналого-цифрового преобразователя, памяти, устройства связи с ПК и ПК оператора. Надежность работы элементов определяется надежностью датчиков и измерительной системы

Поскольку датчики и преобразователи являются частью системы, то для расчета надежности необходимо, помимо самого преобразователя,

оценивать интенсивности отказов проектируемой системы.

В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на надежность системы, могут проводиться прикидочный расчет надежности, расчет при подборе типов элементов и уточненный расчет.

Прикидочный расчет проводится на этапе проектирования. Интенсивность отказов проектируемого блока определяют путем

суммирования значений интенсивностей отказов всех его элементов, т.е.:

$$\lambda = \sum_{i=1}^d N_i \lambda_i,$$

где d – количество элементов, которое в нашей проектируемой системе равно 8; N_i – количество элементов определенного типа; λ_i – интенсивность отказов элементов определенного типа.

Расчет надежности при подборе элементов проводится по интенсивностям отказов элементов различных типов марок с учетом условий их применения. Пересчет интенсивности отказов элемента в нормальных (лабораторных) условиях $\lambda_{0,j}$ на соответствующие условия применения производится по формуле:

$$\lambda_j = \lambda_{0,j} k_i,$$

где k_i – поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора (вибрации, ударные нагрузки, влажность и т.п.).

Поправочные коэффициенты k_i для некоторых факторов приведены в справочной литературе [Дружинин Г.В. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. Учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов. М.: Энергия, 1976. – 448 с.]

Интенсивности отказов элементов проектируемой системы с учетом условий их применения вычисляются по формуле:

$$\lambda_j = \lambda_{0,j} k_{\Sigma} k_3 k_4,$$

где $k_{\Sigma}=1,37$ – коэффициент, учитывающий суммарное воздействие вибраций и ударных нагрузок на корабельную аппаратуру; $k_3=1$ – коэффициент, учитывающий воздействие температуры 40°C при влажности 70%; $k_4=1$ – коэффициент, учитывающий влияние давления на высоте 0 – 1 км.

Расчет интенсивностей отказов элементов системы позволяет оценить интенсивность отказов системы в целом и время наработки на отказ.

1.3. Разработка программы и интерфейса

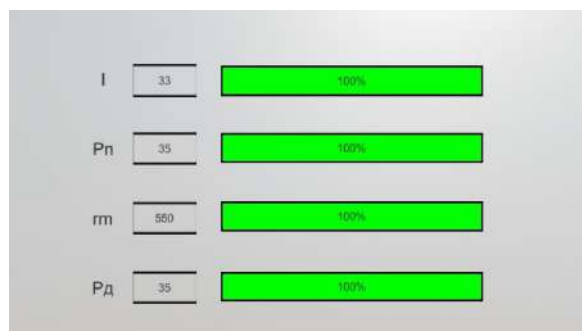
Используя язык программирования C#, а также среду разработки VisualStudio 2022, были разработаны программа и ее интерфейс (рисунок 4, а, б). Программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс расчетов, а также наглядно и просто показывать оператору состояние элементов. Все это даст возможность сэкономить время оператора и уменьшит нагрузку на него.

Программа в реальном времени показывает на индикаторе техническое состояние отслеживаемого элемента на основе его параметров (рисунок 4а), значения которых видны слева. 100% на шкале приравнены к значению параметров, приведенных в технической документации. При изменении значения параметра цвет шкалы будет меняться (рисунок 4б).

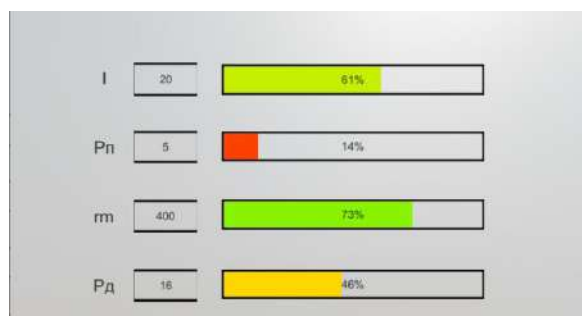
Программа разработана для визуализации параметров и технического состояния элементов

АИС и МАНС. Тем не менее, она универсальна и ее можно использовать практически для любой системы.

Также может быть решена задача внедрения данной программы на панель навигации ранее разработанных систем [19]:



а



б

Рис. 11. Внешний вид интерфейса показателей надежности

2. Результаты

2.1. Расчет надежности системы «человек-машина» для 4 операторов

Основным показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности можно использовать также интенсивность ошибок. Для человека эти показатели должны определяться не в функции времени, а в расчете на одно выполненное действие [20].

Проектируется система отслеживания вероятности отказа элементов системы. Содержанием работы оператора является прием, обработка и расчет данных.

Расчет надежности технических средств дал следующие результаты: вероятность безотказной работы в течение времени расчета для одного элемента $P_T=0,989$; коэффициент готовности $K_2=0,958$.

При анализе системы выявлено три возможных состояния, влияющих на надежность оператора: нормальное (ненапряженное) состояние, дефицит времени, информационная перегрузка. Расчет надежности оператора выполняется по формуле

$$P_{on} = \prod_{i=1}^r P_i^{k_i} = \exp\left(-\sum_{i=1}^r (1 - P_i)^{k_i}\right) = \exp\left(-\sum_{i=1}^r \lambda_i T_i k_i\right), \quad (1)$$

где

P_i – вероятность безошибочного выполнения операция i -го вида;

λ_i – интенсивность ошибок i -го вида;

T_i – среднее время выполнения операции i -го вида.

k_i – количество выполненных операций i -го вида;

r – количество различных типов операций ($i=1,2,\dots,r$).

Расчет для каждого из этих состояний, дал следующие результаты:

$P_{on1}=0,975$; $P_{on2}=0,960$; $P_{on3}=0,945$.

Время обработки данных оператором распределено по нормальному закону с параметрами $t_{on}=3$ мин, $\sigma_t=0,8$ мин. Лимит времени, отводимый на обработку данных, зависит от вида данных, предварительного ожидания их в очереди, скорости обработки их в аппаратуре и других факторов. Поэтому это время – случайная величина с законом распределения, близким к нормальному. Параметры закона $t_{\tau}=5,8$ мин; $\sigma_{\tau}=1,2$ мин.

Из опыта эксплуатации систем подобного рода известно, что неготовую и отказавшую технику можно восстановить примерно в 50% случаев, т.е. принять $P_{вос}\approx 0,5$. Оператор может контролировать с помощью инструментального самоконтроля примерно 80% своих действий, т.е. $P_{\kappa}=0,8$. Вероятность обнаружения оператором сигнала схемы контроля $P_{обн}=0,99$.

На пункте управления работают независимо $N=3$ оператора, действиями которых руководит старший оператор, коэффициент загрузки которого, найденный при анализе его деятельности, составляет $\eta=0,6$. Вероятности состояний системы «человек-машина» (СЧМ), найденные методом статистического моделирования, следующие: $P_1=0,7$; $P_2=0,2$; $P_3=0,1$.

Надежность указанной СЧМ рассчитываем по формуле

$$P_{чм} = K_2 P_T P_{on} P_{св} + (1 - K_2 P_T) P_{вос} P_{on} P_{св} + (1 - P_{on}) P_T P_{исп}, \quad (2)$$

где

P_{on} – вероятность безошибочной работы оператора по выполнению задачи ликвидации аварийной ситуации;

$P_{св}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий;

$P_{исп}$ – вероятность исправления ошибочных действий.

$P_{вос}$ – вероятность восстановления техники;

P_T – вероятность безотказной работы технических устройств;

K_2 – коэффициент готовности техники.

Вероятность своевременного проведения расчетов:

$$P_{св} = P\{\tau_{on} < t_{\tau}\} = 0,5 + \Phi_0\left[\frac{t_{\tau} - \tau_{on}}{\sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_{\tau}^2}}\right] \approx 0,978, \quad (3)$$

где

τ_{on} – общее время решения задачи оператором.

σ_t, σ_{τ} – параметры нормального распределения;

$\Phi_0(x)$ – интеграл Лапласа.

Вероятность своевременного исправления ошибки:

$$P_u(t_{\tau}) = P\{\tau_{реш} < t_{\tau}\} = 0,5 + \Phi_0\left[\frac{t_{\tau} - \tau_{реш}}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{реш}^2}}\right], \quad (4)$$

Величины $\tau_{реш}$ и $\sigma_{реш}$ определяем по выражениям:

$$\tau_{реш} = \tau_{on} \frac{1 + P_{on}}{P_{on}} \approx 6,06 \text{ мин}, \quad (5)$$

$$\sigma_{реш} = \sigma_{\tau} \frac{1 + P_{on}}{P_{on}} \approx 1,62 \text{ мин}, \quad (6)$$

Подставляя найденные значения в формулу (4), получаем $P_u(t_{\tau}) = 0,411$. После этого находим вероятность исправления ошибки:

$$P_{исп} = P_{\kappa} P_{обн} P_u(t_{\tau}) \approx 0,323, \quad (7)$$

Тогда вероятность безотказной работы оператора с учетом резервирования его работы:

$$P'_{on} = 0,983. \quad (8)$$

Значение P'_{on} необходимо использовать в дальнейшем в качестве вероятности безошибочной работы оператора. Поскольку теперь известны все составляющие, входящие в выражение (2), можно найти вероятность выполнения задачи комплексом «человек – машина».

$$P_{ч.м} = 0,944, \quad (9)$$

Эта вероятность получена для нормальных условий работы оператора. Путем аналогичного расчета получаем в двух других режим работы эта вероятность равно соответственно 0,929 и 0,916. Средняя вероятность своевременного и правильного обслуживания сообщения СЧМ:

$$P_{ч.м} = \sum_{i=1}^3 P_i P_{ч.м} / i = 0,938, \quad (10)$$

которую и следует использовать как показатель надежности СЧМ.

2.2. Расчет надежности системы «человек-машина» для 1 оператора

Рассчитаем показатель надежности СЧМ для той же системы, но с 1 оператором. Расчеты и значения для формул (3)-(7) остаются те же.

$$\bar{P}_{on} = \sum_{i=1}^3 P_i P_{on} / i = 0,579, \quad (11)$$

$$P_{ч.м} = 0,687, \quad (12)$$

Эта вероятность получена для нормальных условий работы оператора. Путем аналогичного расчета для двух других режимов работы вероятности составят 0,654 и 0,641.

$$P_{ч.м.} = \sum_{i=1}^3 P_i P_{ч.м.} / i = 0,676. \quad (13)$$

Как видно из расчетов, сокращение количества операторов с 4 до 1 приводит к снижению показателя надежности СЧМ почти в 1,5 раза, что повышает риск аварии. Решением этой проблемы является автоматизация процесса расчета данных. Таким комплексом выступает система удаленного сбора данных.

Принцип работы такой системы:

- регистратор собирает данные с подключенных датчиков;
- эти данные записываются во внутреннюю память;
- каждый определенный промежуток времени эти данные передаются на устройство оператору;
- программа обрабатывает и показывает конечный результат.

Основой в такой системе являются датчики, которые крепятся к важным элементам и измеряют необходимый параметр.

Ключевая роль в данном проекте отведена программному обеспечению, позволяющему автоматизировать процесс расчетов, а также наглядно и просто показывать оператору состояние элементов. Все это позволяет сэкономить время оператора и уменьшит его нагрузку.

2.3. Расчет надежности системы «человек-машина» для 1 оператора с внедрением системы удаленного доступа

Для определения надежности оператора и определении времени решения задачи оператором при внедрении системы удаленного доступа можно

использовать сетевые модели, применяемые в методах сетевого планирования и управления (СПУ). Для построения сетевой модели деятельность оператора разбивается на элементарные операции. Функция своевременности выполнения работы рассчитывается по формуле:

$$P_{св} = P(\tau_{on} < t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \\ = \Phi_0\left(\frac{\bar{\tau}_{on}}{\sigma_{\tau}}\right) + \Phi_0\left(\frac{t - \bar{\tau}_{on}}{\sigma_{\tau}}\right), \quad (14)$$

где $\bar{\tau}_{on}$, σ_{τ} – математические ожидания и дисперсии продолжительности критических работ.

Сетевой метод по сравнению с другими методами, во-первых, наиболее адекватно учитывает структуру деятельности оператора (последовательно-параллельный характер выполнения отдельных действий). Во-вторых, с его помощью время решения задачи можно описать усеченным снизу нормальным распределением, т.е. кривая распределения имеет свою типичную форму. В-третьих, данный метод не накладывает в принципе никаких ограничений на вид законов распределения времени выполнения отдельных действий.

При возникновении аварии в технологическом процессе на пульте управления включается звуковой сигнал. По этому сигналу оператор должен оценить, в какой из возможных зон находятся показания прибора. Определить время, затрачиваемое оператором на перевод процесса в требуемый режим, и вероятность своевременного реагирования, если норматив времени составляет 15 с. Параметры $\bar{\tau}_{on} = 11.24$ с, $\sigma_{\tau} = 1.41$ с взяты из справочных данных.

Вероятность своевременного выполнения работы можно определить по известной функции своевременности, определяемой выражением (14): $P_{св} = P(\tau_{on} < 15с) = 0.994$. (15)

Следовательно, в среднем только в четырех случаях из 1000 оператор не сумеет своевременно среагировать на сигнал и ликвидировать аварию.

Значит, можно рассчитать показатель надежности СЧМ для той же системы, но с внедрением системы удаленного доступа по формуле (2).

В результате расчетов вероятность безотказной работы СЧМ после внедрения системы равна 0,977, что существенно повышает надежность всей системы.

Заключение

В работе было выполнено:

- выбор алгоритма и математической модели для оценки показателей надежности системы;
- разработка программного кода для автоматического вычисления параметров надежности системы;
- разработка оригинального и понятного интерфейса оператора.

- рассчитана надежность системы «Человек-машина» для 4 и 1 операторов
- разработан программно-аппаратный комплекс для оценки надежности функционирования элементов АИС и МАНС;
- разработана программа для отслеживания технического состояния элементов АИС и МАНС с простым интерфейсом.

Использование системы телеметрии позволяет ввести информационный параметр о состоянии автономного судна. Подобные системы должны строиться на основании сложных комплексных

моделей [21-23], включающих в себя множество параметров не только для малых судов, но и транспортных судов и судов специального назначения. В этом случае модели элементов электроэнергетической системы могут быть задействованы в комплексах связи и управления.

Экономическая целесообразность разработки программно-аппаратного комплекса состоит в том, что представленный комплекс позволяет повысить безопасность судоходства за счет снижения нагрузки на оператора и снижения вероятности человеческой ошибки.

Литература

1. IMO MSC 85/26/Add.1, Annex 21. Framework for the implementation process for the E-Navigation strategy. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Стандарт МЭК 61993-2:2001(E). Ч. 2: Судовое оборудование универсальной автоматической идентификационной системы (АИС) класса А. Технические и эксплуатационные требования, методы и требуемые результаты испытаний. — Женева, Швейцария: изд. МЭК, 2001. — 119 с.
3. Tu E. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, G. B. Huang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.
4. Alincourt E. Methodology for AIS signature identification through magnitude and temporal characterization / E. Alincourt, C. Ray, P. Ricordel, D. Dare-Emzivat, A. Boudraa // OCEANS 2016 – Shanghai. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485420.
5. Беляшов В. А. Инновационные разработки Крыловского государственного научного центра для повышения безопасности и надежности судов с винто-рулевыми колонками в экстремальных ледовых условиях / В. А. Беляшов, Н. В. Васильев, В. В. Макаров, Л. Г. Паутов // Арктика: экология и экономика — 2018 — №1 (29). — С. 92—103.
6. Komianos A.: The Autonomous Shipping Era. Operational, Regulatory, and Quality Challenges. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 2, doi:10.12716/1001.12.02.15, pp. 335-348, 2018 (https://www.transnav.eu/Article_The_Autonomous_Shipping_Era_Operational_Regulatory_and_Quality_Challenges_Komianos_46,818.html)
7. Yan R., Pang S., Sun H., Pang Y. Development and missions of unmanned surface vehicle. Journal of Marine Science and Application . Vol. 9, No. 4, p.p. 451 – 457. doi.org/10.1007/s11804-010-1033-2 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-78649702222&origin=inward&txGid=9b151834b4a8444f2a4c6545357e3d77&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1
8. Jing, W., Liu, C., Li, T., Rahman, A.B.M.M., Xian, L., Wang, X., Wang, Y., Guo, Z., Brenda, G., Tendai, K.W.: Path Planning and Navigation of Oceanic Autonomous Sailboats and Vessels: A Survey. Journal of Ocean University of China. 19, 3, 609–621 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11802-020-4144-7>.
9. Barrera, Carlos et al. “Trends and Challenges in Unmanned Surface Vehicles (USV): From Survey to Shipping.” (2021). DOI: 10.12716/1001.15.01.13
10. Tanakitkorn, K. (2019). A review of unmanned surface vehicle development. MaritimeTechnologyandResearch. doi.org/10.33175/mtr.2019.140730
11. Bertram, Samuel et al. “A portable ASV prototype for shallow-water science operations.” OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey (2016): 1-6. 10.1109/OCEANS.2016.7761403
12. Zhou, X et al. “The design and application of an unmanned surface vehicle powered by solar and wind energy.” 2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA) (2015): 1-10. DOI: 10.1109/PESA.2015.7398958
13. J.E. Manley. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. OCEANS 2008 (2008), pp. 1-4, 10.1109/OCEANS.2008.5152052
14. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.
15. B. Bayat, N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. CurrentOpinioninBiotechnology, 2017. № 45. – P. 76–84.
16. Matthew Dunbabin, Alistair Grinham, James Udy. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. AnAutonomousSurfaceVehicleforWaterQualityMonitoring.
17. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. Annual of navigation. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
18. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.

19. Burylin Y.. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
20. Bolvashenkov, I., Kammermann, J., Frenkel, I., & Herzog, H. (2020). Reliability-Oriented Design of Vehicle Electric Propulsion System Based on the Multilevel Hierarchical Reliability Model. In (Ed.), Intelligent and Efficient Transport Systems - Design, Modelling, Control and Simulation. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90508>
21. Гринек А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Перельгин Д.Н., Савостеенко Н.В. Конечно-элементное моделирование судового генератора. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-4 (50). С. 92-97.
22. Юдин Ю.И., Боран-Кешишьян А.Л., Холичев С.Н., Глинская И.В. Математическое моделирование движения танкера, управляемого на основе отклонений от линии заданного пути. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3 (41) Т.1. С. 228 – 232
23. Боран-Кешишьян А.Л., Попов В.В. Кондратьев С.И. Отдельные математические модели описывающие радиотракт и ЭМС множества взаимодействующих радиосредств в береговом сегменте АПК е-навигации. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3 (41) Т. С. 170 – 175.

References

1. IMO MSC 85/26/Add.1, Annex 21. Framework for the implementation process for the E-Navigation strategy. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Стандарт МЭК 61993-2:2001(E). Ч. 2: Судовое оборудование универсальной автоматической идентификационной системы (АИС) класса А. Технические и эксплуатационные требования, методы и требуемые результаты испытаний. — Женева, Швейцария: изд. МЭК, 2001. — 119 с.
3. Tu E. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, G. B. Huang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.
4. Alincourt E. Methodology for AIS signature identification through magnitude and temporal characterization / E. Alincourt, C. Ray, P. Ricordel, D. Dare-Emzivat, A. Boudraa // OCEANS 2016 – Shanghai. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485420.
5. Belyashov V.A., Vasil'ev N.V., Makarov V.V., Pautov L.G. Innovacionnye razrabotki Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra dlya povyshe-niya bezopasnosti i nadezhnosti sudov s vinto-rulevnyimi kolonkami v ekstremal'nyh ledovyh usloviyah [Innovative developments of the Krylov State Research Center to improve the safety and reliability of ships with rudder propellers in extreme ice conditions] Arktika: ekologiya i ekonomika — 2018 — №1 (29). — pp. 92—103
6. Komianos A.: The Autonomous Shipping Era. Operational, Regulatory, and Quality Challenges. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 2, doi:10.12716/1001.12.02.15, pp. 335-348, 2018 (https://www.transnav.eu/Article_The_Autonomous_Shipping_Era._Operational,_Regulatory,_and_Quality_Challenges_Komianos,46,818.html)
7. Yan R., Pang S., Sun H., Pang Y. Development and missions of unmanned surface vehicle. Journal of Marine Science and Application . Vol. 9, No. 4, p.p. 451 – 457. doi.org/10.1007/s11804-010-1033-2 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-78649702222&origin=inward&txGid=9b151834b4a8444f2a4c6545357e3d77&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1
8. Jing, W., Liu, C., Li, T., Rahman, A.B.M.M., Xian, L., Wang, X., Wang, Y., Guo, Z., Brenda, G., Tendai, K.W.: Path Planning and Navigation of Oceanic Autonomous Sailboats and Vessels: A Survey. Journal of Ocean University of China. 19, 3, 609–621 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11802-020-4144-7>.
9. Barrera, Carlos et al. “Trends and Challenges in Unmanned Surface Vehicles (USV): From Survey to Shipping.” (2021). DOI: 10.12716/1001.15.01.13
10. Tanakitkorn, K. (2019). A review of unmanned surface vehicle development. MaritimeTechnologyandResearch. doi.org/10.33175/mtr.2019.140730
11. Bertram, Samuel et al. “A portable ASV prototype for shallow-water science operations.” OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey (2016): 1-6. 10.1109/OCEANS.2016.7761403
12. Zhou, X et al. “The design and application of an unmanned surface vehicle powered by solar and wind energy.” 2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA) (2015): 1-10. DOI: 10.1109/PESA.2015.7398958
13. J.E. Manley. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. OCEANS 2008 (2008), pp. 1-4, 10.1109/OCEANS.2008.5152052
14. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.
15. B. Bayat, N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. CurrentOpinioninBiotechnology, 2017. № 45. – P. 76–84.
16. Matthew Dunbabin, Alistair Grinham, James Udy. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. AnAutonomousSurfaceVehicleforWaterQualityMonitoring.
17. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J. Narkiewicz, G.Świątoń. Annual of navigation. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
18. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.

19. Burylin Y. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
20. Bolvashenkov, I., Kammermann, J., Frenkel, I., & Herzog, H. (2020). Reliability-Oriented Design of Vehicle Electric Propulsion System Based on the Multilevel Hierarchical Reliability Model. In (Ed.), Intelligent and Efficient Transport Systems - Design, Modelling, Control and Simulation. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90508>
21. Grinek A.V., Fischenko A.M., Boychuk I.P., Perelygin D.N., Savosteenko N.V. Finite element simulation of marine generators. Marine intellectual technologies, № 4 part 4, 2020. –pp.92-97.
22. Uryi I. Udin, Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey N. Holichev, Irina V. Glinskaia Mathematical modeling of tanker broadside motion controlled on the basis of deviations from the aimed line. Marine intellectual technologies, 3 (41), 2018. –pp.228-232.
23. Anastas L. Boran-Keshishyan, Viktor V. Popov, Sergey I. Kondratiev, Individual mathematical models describing the radio channel and ems to a variety of interactive radio in the coastal segment of APK of e-navigation. Marine intellectual technologies, 3 (41), 2018. –pp.170-175.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анна Владимировна Гринек, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, email: grinyokann@gmail.com

Игорь Петрович Бойчук, кандидат технических наук, начальник кафедры высшей математики и физики, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: igor_boichuk@mail.ru

Сергей Александрович Лицкевич, кандидат технических наук, доцент кафедры "Радиоэлектроника и информационные технологии", Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: lion_novoross@mail.ru

Ольга Николаевна Лицкевич, старший преподаватель кафедры высшей математики и физики, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: olga28.a@mail.ru

Сергей Иванович Кондратьев, доктор технических наук, профессор, ректор, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: mail@nsma.ru

Anna V. Grinek, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Department of Ship's electric and automatic devices, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: grinyokann@gmail.com

Igor P. Boychuk, Ph.D. (Eng), Associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: boychuk@ieee.org

Sergey A. Litskevich, Ph.D. (Eng), Associate professor, Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: lion_novoross@mail.ru

Olga N. Litskevich, Assistant professor Department of Higher Mathematics and Physics, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: olga28.a@mail.ru

Kondrat'ev I. Sergej, Dr. Sci. (Eng), professor, rector, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: mail@nsma.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.07.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.10.2022.

Научная статья

УДК 629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>

Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов

К.Д. Крестовников¹ k.krestovnikov@iias.spb.su, А.А. Ерашов¹ erashov.a@iias.spb.su,

А.И. Савельев¹ saveliev@iias.spb.su

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальным направлением применения автономных необитаемых подводных аппаратов в рамках гражданских задач является нефтегазовый сектор. Задачи гидрохимического мониторинга акваторий, сейсмических исследований и инспекции инфраструктуры месторождений могут быть успешно решены посредством робототехнических комплексов. Время работы автономного необитаемого подводного аппарата ограничено энергоемкостью применяемого аккумулятора, в связи с чем задача обеспечения заряда аккумуляторной батареи является актуальной. В работе представлен подход, состоящий из геометрической схемы и алгоритма динамического позиционирования автономного подводного аппарата, для реализации беспроводного заряда аккумуляторной батареи. Работа алгоритма основана на принципе вычисления положения центра ArUco-маркера относительно центра объектива камеры системы технического зрения. Отличительной особенностью алгоритма является использование рабочих параметров беспроводной системы передачи энергии для принятия решений об остановке или продолжении позиционирования аппарата. Алгоритм позволяет корректировать положение подводного аппарата в процессе заряда при уменьшении эффективности передачи энергии, а также в процессе позиционирования аппарата до начала заряда аккумулятора. Анализ результатов моделирования показал, что эффективность передачи энергии при наличии подводного течения снижается на 12-15% относительно максимальной эффективности, соответствующей величине эффективности передачи энергии при отсутствии течения. При этом средняя эффективность для различной скорости течения меняется незначительно на 0,6-1,76%. Разработанный алгоритм возможно адаптировать к аппаратам с различными принципами управления перемещением и погружением.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, беспроводная передача энергии, динамическое позиционирование, техническое зрение

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3094.2022.1.6

Для цитирования: Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Савельев А.И. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 144—155.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>

Approach to wireless battery charging of autonomous underwater vehicles

Konstantin D. Krestovnikov¹ k.krestovnikov@iias.spb.su, Aleksei A. Erashov¹ erashov.a@iias.spb.su, Anton I.

Saveliev¹ saveliev@iias.spb.su

¹Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The oil and gas sector is relevant direction of the autonomous underwater vehicles application within the frameworks of civilian tasks. The tasks of the water areas hydrochemical monitoring, seismic research and field infrastructure inspections can be successfully solved by robotic complexes. The time of working of the autonomous underwater vehicle is limited by the energy capacity of the using battery, in connection with which the task of the battery charging process providing is important. In this paper the approach, consisting of geometric model and algorithm of dynamic positioning of the autonomous underwater vehicle, is presented to realize wireless charging battery. Algorithm is based on principle of the calculation the ArUco-marker center position relate to center of the computer vision camera lens. The algorithm distinctive feature is using of the working parameters of the wireless power transmission system to decide whether to stop or continue vehicle positioning process. The algorithm allows adjusting the position of the autonomous underwater vehicle during the charging process with a decrease in the efficiency of energy transfer, as well as in the positioning process of the vehicle before the beginning of the battery charging. The analysis of the modeling results showed that energy transfer efficiency in the presence of the underwater current decreases by 12-15% relative to the maximum of the efficiency, corresponding to value of the efficiency in the absence of the underwater current. In this case, the average efficiency for different values of the underwater current velocity varies slightly by 0.6-1.76%. The developed algorithm can be adapted to the vehicles with different principles of movement and immersion control.

Keywords: autonomous underwater vehicle, wireless energy transfer, dynamic positioning, computer vision

Acknowledgments: the work was supported by the grant МК-3094.2022.1.6 from the President of the Russian Federation.

For citation: Konstantin D. Krestovnikov, Aleksei A. Erashov, Anton I. Saveliev. Approach to wireless battery charging of autonomous underwater vehicles, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 144—155.

Введение

Подводные робототехнические комплексы позволяют выполнять широкий набор гражданских, научных и военных задач. В рамках гражданских задач автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) успешно демонстрируют свою эффективность при выполнении подводно-технических работ в нефтегазовом секторе. В процессе работы АНПА могут проводить инспекцию подводных сооружений и коммуникаций месторождения, которая включает в себя распознавание отклонений от эталонных или заданных изображений, экологический мониторинг в районе месторождения, фото- и видеосъемку морского дна, резонансно-акустическое профилирование, обслуживание систем освещения, прокладку и обследование трубопроводов и кабелей. На месторождениях, обустроенных с использованием подводного добычного комплекса, АНПА могут выполнять задачи обслуживания оборудования в части очистки, замены деталей и съемных модулей. Основные подводные работы в настоящее время выполняются, как правило, с использованием телеуправляемых подводных аппаратов, которые посредством кабель-троса связаны со специальным обслуживающим судном. Данная технология имеет ряд существенных недостатков [1]: значительные финансовые затраты на проведение работ, расходы времени на погружение и поднятие аппарата, зависимость от погодных условий, возникновение ситуаций запутывания или повреждения кабель-троса. Ввиду этого, например, для арктического региона с тяжелой ледовой и погодной обстановкой в совокупности с сильными подводными течениями целесообразно применение автономных АНПА. Таким образом, перспективна разработка автономных АНПА и создание соответствующих вспомогательных технологий.

Наиболее часто в качестве источника энергии автономного АНПА используется аккумуляторная батарея. Энергетический ресурс батареи ограничен и для функционирования аппарата периодически требуется ее замена или заряд. Замена аккумуляторной батареи может происходить на надводной или подводной станции. Замена аккумулятора с подъемом аппарата на поверхность может быть невозможна при неблагоприятной ледовой или погодной обстановке, а также подразумевает дополнительные финансовые затраты и расходы времени обслуживающего персонала. Реализация процесса заряда в рамках подводной инфраструктуры позволит снизить затраты на проведение миссий и увеличить продолжительность автономного функционирования АНПА. В связи с этим задача обеспечения заряда аккумуляторной батареи в подводных условиях является актуальной. Заряд АНПА возможен под водой с применением контактных методов. Использование контактных систем заряда, в которых необходимо вмешательство человека, снижает автономность системы при эксплуатации. Контактные методы, подразумевающие автономную

эксплуатацию, требуют высокой точности позиционирования АНПА и усложнение его сенсорной системы, а также применения особых методов для защиты контактных пар от воздействия окружающей среды [2]. Беспроводная передача энергии является перспективной технологией для заряда аккумулятора АНПА, которая позволяет выполнять данный процесс без подъема аппарата на поверхность и одновременно не имеет недостатков контактных методов [3-5].

Бесконтактная передача энергии от зарядной станции подразумевает, что АНПА будет находиться на некотором расстоянии от поверхностей станции. При этом ввиду движения водных масс и неточной работы исполнительных устройств возможно смещение аппарата относительно желаемой точки позиционирования на величины, превышающие заданные допустимые значения. При использовании беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) смещения между приемной и передающей частями системы влияют на эффективность передачи энергии. Для поддержания максимального уровня эффективности передачи энергии необходимо обеспечивать заданное положение АНПА относительно зарядной станции, что осуществимо посредством динамического позиционирования.

Зачастую для позиционирования автономных АНПА используются акустические методы с короткой, сверхкороткой и длинной базовой линией для определения относительного положения аппарата [6-8]. Так, для определения направления движения в [4] используется метод ультракороткой базовой линии и алгоритмы обработки изображений с камеры, установленной в носовой части АНПА. На док-станции установлен излучатель света, признаки которого определяются на изображениях с помощью предложенного в данной работе метода. Как отмечают авторы, применение визуальной навигации необходимо для увеличения точности позиционирования АНПА на расстояниях, не превышающих 15 м от док-станции.

В качестве недостатков акустических методов локализации и навигации АНПА выделяют низкую скорость обновления и низкую пропускную способность сенсоров, а также высокую стоимость датчиков и систем обработки сигналов [7, 9, 10].

Другой способ определения относительного положения АНПА при позиционировании заключается в использовании систем технического зрения. Для локализации АНПА возможно применение SLAM-алгоритмов [11-13]. Так, для навигации и позиционирования при беспроводном способе передачи энергии АНПА Home-I mini используются данные с сенсоров и камер, которые подаются SLAM-алгоритму и алгоритму обработки изображений для поиска поверхности зарядной станции со специально нанесенным на нее рисунком [14]. Из недостатков авторы отметили, что в условиях сильного замутнения воды затруднительна навигация на больших расстояниях, кроме того, позиционирование усложняется в условиях низкой рельефности местности, на которой устанавливается зарядная станция. В целом SLAM-алгоритмы отличаются высокой вычислительной

сложностью. Кроме того, некоторые разновидности SLAM-алгоритмов применимы только при медленном перемещении АНПА [13].

Также в задачах позиционирования АНПА помимо SLAM-алгоритмов возможно применение алгоритмов по поиску реперных маркеров ArUco, ARToolKit и AprilTag на изображении [15]. Данное направление активно развивается, публикуются исследования, посвященные улучшению детектирования маркеров в подводных условиях, так как точность определения маркера зависит от условий освещенности, рассеивания света, а также от степени мутности воды [16, 17].

В исследовании [15] было показано, что программная библиотека для определения ArUco-маркера в условиях сильного замутнения воды позволяет определить маркеры с минимальными размерами 50×50 мм, минимальные размеры для детектирования маркеров ARToolKit и AprilTag составили 20×20 мм. В условиях сильного замутнения воды с освещением, соответствующим условиям неглубокого моря (яркость 35 люкс), максимальная дистанция определения маркеров ARToolKit и ArUco составила примерно 0,55-0,6 м, у AprilTag – примерно 1,05 м, а в условиях имитирующей освещенности в глубоком море с дополнительной светодиодной подсветкой, минимальное расстояние определения маркеров составило примерно 0,85 м и 1,1 м соответственно. Как отметили авторы, библиотека детектирования маркеров AprilTag требовала больше времени на определение маркеров на изображении, что также подтверждается исследованием [16]: время определения AprilTag составило 871,732 мс, а ArUco-маркера – 97,862 мс. Также в работе [16] предложен алгоритм, позволяющий увеличить точность детектирования ArUco-маркеров под водой.

Для локализации и позиционирования АНПА Sibiu Pro в работе [8] используются ArUco-маркеры с размерами 120×120 мм. По экспериментальным данным авторы получили интерполяционную функцию, позволяющую вычислять дистанцию до маркера по количеству пикселей, принадлежащих маркеру на изображении. При этом наименьшая ошибка определения расстояния до маркера, как отмечают авторы, достигается, когда маркер находится в центре изображения. Помимо технического зрения для задач локализации и позиционирования АНПА авторы использовали дополнительные средства: сонары, датчик Doppler Velocity Logger, GPS, а эксперименты проводились в бассейне. Разработанные решения позволили реализовать локализацию АНПА с точностью, превышающей локализацию с помощью традиционных датчиков.

Метод навигации и локализации с помощью массива из ArUco-маркеров предложен в [7]. Метод включает в себя модель шума, которая позволяет корректировать информацию о положении каждого маркера в системе отсчета камеры, а также алгоритм для вычисления положения АНПА с учетом положения локальных маркеров. Массив маркеров, как отмечают авторы, предложено использовать для увеличения точности локализации АНПА. Эксперименты проводились в бассейне с незамутненной водой и дневным освещением, массив маркеров располагался на дне бассейна,

длина использованного АНПА составляла 0,2 м. Анализ результатов экспериментов с перемещением АНПА по траектории показал, что положение АНПА вычислялось с отклонениями от реального положения в диапазоне от 0,2 до 0,5 м. ArUco-маркеры также были использованы для увеличения точности позиционирования АНПА и манипулирования объектами стыковочной станции в работе [18].

Позиционирование АНПА также возможно с применением оптических излучателей. Так, для позиционирования АНПА в [19] используется L-образное соединение излучателей света на стыковочной станции. В работе предложен алгоритм, позволяющий определять источники света и вычислять расстояние от АНПА до стыковочного объекта с помощью известных геометрических соотношений. Кроме того, алгоритм разработан с учетом частичного определения излучателей. Как отмечают авторы, в комплексной подводной среде предлагаемый алгоритм не идеален для позиционирования там, где есть большой продольный угол наклона.

Также оптический принцип для позиционирования АНПА рассмотрен в [20]. Авторы разработали систему для определения положения, ориентации и скорости АНПА, которую предполагается размещать в носовой части АНПА. Система представляет собой массив размерностью 5×5 из фотодатчиков, установленных на поверхности полусферического корпуса. На док-станции установлен излучатель света, принцип работы данной системы подобен работе маяка [21]. Посредством обработки сигналов с массива датчиков система управления АНПА рассчитывает расстояние, угловые положения и скорость, а далее определяет параметры движения. Для преобразования данных с фотодатчиков используется алгоритм отображения спектрального угла (Spectral Angle Mapper algorithm). Анализ результатов экспериментов показал, что ошибка определения положения АНПА не превышала 0,2 м, скорости – 0,2 м/с, для углов тангажа и рыскания – не более 5°. Массив оптических датчиков схожей конструкции также был предложен в [22]. Аналогичный подход с излучателем рассмотрен в [23], где предложено использовать три треугольных излучателя света, образующих вместе треугольную фигуру. Расстояние до маяка вычисляется по геометрическим соотношениям. Условия экспериментальной проверки в работе отсутствуют, также нет данных о точности определения расстояния до маяка, ввиду чего затруднительно сделать выводы о потенциальной применимости предложенного решения. Навигационные излучатели также использованы в [24]. Для определения положения точки позиционирования АНПА Dolphin II [25] обрабатываются изображения с бинокулярной камеры. Анализ результатов экспериментов показал, что точка позиционирования АНПА определялась с ошибкой в диапазоне от 4,45 мм до 124,36 мм в диапазоне расстояний 1200-3600 мм.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности применения технического зрения для динамического позиционирования АНПА при передаче энергии от БСПЭ. В предыдущих исследованиях авторами обсуждалось, что возможно

реализовать динамическое позиционирование роботов для передачи энергии с применением технического зрения и БСПЭ [26]. Результаты рассмотренных работ показывают значительные преимущества в точности измерения углов и расстояний при использовании AgUco-маркера для позиционирования АНПА. Также использование AgUco-маркеров дает преимущество во времени определения по сравнению с другими типами маркеров. Анализ работ в области позиционирования АНПА для заряда аккумуляторных батарей посредством беспроводной передачи энергии позволяет сделать вывод об отсутствии решений, которые комплексно используют информацию, получаемую от системы технического зрения, и информацию о параметрах передачи энергии от БСПЭ.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка подхода, повышающего автономность АНПА и снижающего издержки при эксплуатации, за счет автоматизации процесса заряда аккумуляторных батарей посредством БСПЭ на подводной зарядной станции. Задача проводимого исследования формулируется следующим образом. Даны АНПА и подводная зарядная станция. АНПА оборудован приемной частью БСПЭ, а зарядная станция – передающей. На АНПА установлена камера системы технического зрения и вычислительный комплекс, применяемые для распознавания AgUco-маркера, расположенного на зарядной станции. При выполнении рабочих задач расходуется заряд аккумуляторной батареи АНПА, после достижения некоторого минимального значения аппарат следует к зарядной станции. Для передачи энергии между АНПА и зарядной станцией необходимо позиционировать АНПА с достаточной для передачи энергии точностью. В данной работе не рассматривается какая-либо фиксация АНПА относительно зарядной станции, так как это значительно усложняет конструктивные решения зарядной станции. Согласно ранее проводимым исследованиям, эффективность работы и передаваемая мощность БСПЭ в значительной мере зависят от расстояний и смещений между передающей и приемной частью. Ввиду постоянного движения водных масс положение аппарата относительно БСПЭ требуется корректировать, чтобы процесс заряда протекал с меньшими потерями энергии. Для решения поставленной задачи необходимо задаться геометрической моделью, определить рабочие параметры БСПЭ, которые позволят оценить эффективность передачи энергии, и разработать алгоритм динамического позиционирования.

Геометрическая модель

Проведенный анализ ряда работ в направлении беспроводного заряда аккумуляторной батареи АНПА позволяет выделить следующие места установки приемной части системы или приемной катушки БСПЭ. Горизонтальное расположение приемной части системы в основании АНПА (см. рис. 1, а) рассмотрено авторами работы [14, 27]. Аналогичный способ размещения использовался в [28], где был предложен беспроводной способ

передачи энергии и данных между зарядной станцией и АНПА.

Также возможно горизонтальное размещение приемной части БСПЭ сверху АНПА (см. рис. 1, б). Данный способ установки рассмотрен авторами работы [29], где для малого АНПА была разработана приемная часть с размерами 240×240×15 мм, которая позволила передавать энергию и данные на АНПА, при этом передаваемая мощность составила 24 Вт.

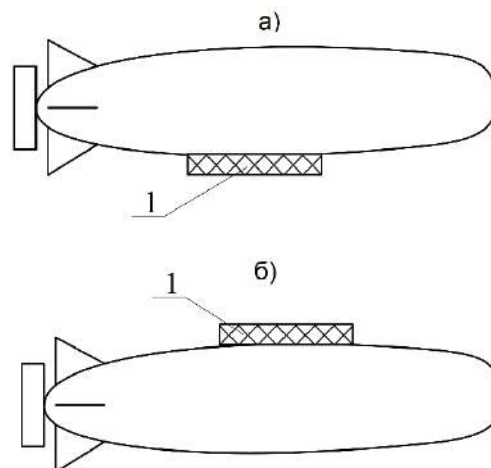


Рис. 1. Горизонтальная установка приемной части БСПЭ (1) на АНПА: а) снизу в основании; б) сверху

Для АНПА с корпусом цилиндрической формы возможна установка катушки соленоидного типа снаружи на корпусе аппарата (рис. 2). Данный способ установки катушки приемной части использован в аппарате, который представлен в работе [3]. Рассмотренный в работе АНПА имеет торпедную форму, конструкция зарядной станции представляет собой конусообразную направляющую, к которой присоединен полый цилиндр, на поверхности которого размещена катушка передающей части БСПЭ. Аналогичный способ установки катушки приемной части рассмотрен в работах [30, 31].

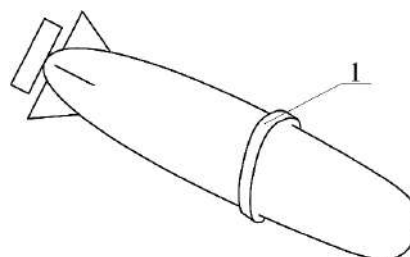


Рис. 2. Установка катушки приемной части БСПЭ соленоидного типа (1) снаружи на корпусе АНПА

Данный способ установки БСПЭ на АНПА и зарядной станции актуален для аппаратов торпедной формы. Однако необходимо, чтобы корпус аппарата был изготовлен из экранирующего материала, соответствующего по параметрам рабочей частоте БСПЭ, или чтобы электроника была размещена в местах, в которых нет воздействия магнитных полей, создаваемых БСПЭ. Перечисленные особенности делают данный вариант установки приемной части БСПЭ на АНПА менее универсальным и конструктивно более сложным, чем способы

горизонтального расположения системы в основании АНПА.

Анализ научных работ в направлении позиционирования АНПА с применением систем технического зрения показал, что чаще всего камеры устанавливают следующим образом. Возможна установка камеры в передней части АНПА или в носовой части аппаратов с корпусом аппарата торпедной формы (см. рис. 3, а). Данный способ использовался авторами ранее рассмотренных работ [4, 14, 18]. Также возможна установка камер в нижней части АНПА с направлением оптической оси камеры вниз (см. рис. 3, б). Данный способ рассмотрен в работах [7, 14]. Аналогичный способ установки камеры использован в АНПА Sparus II [32], предназначенного для инспекции морского дна. Кроме того, существуют АНПА, в котором совмещены оба ранее рассмотренных способа установки камеры. Так, в АНПА торпедной формы Urashima [33] используются две камеры: одна на носовой части, другая – в нижней. Камеры, как отмечают авторы, использовались для научных исследований.

Учитывая конструктивные особенности АНПА, принципы работы технического зрения и БСПЭ, разработаны следующие геометрические модели, описывающие совместную установку данных систем (см. рис. 3).

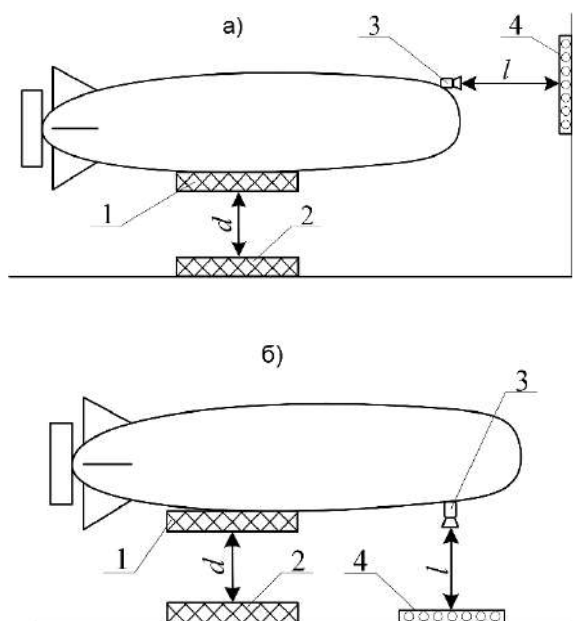


Рис. 3. Геометрические модели АНПА и зарядной станции: а) размещение камеры технического зрения в носовой части АНПА; б) размещение камеры технического зрения в нижней части АНПА; 1 – приемная часть БСПЭ, 2 – передающая часть БСПЭ, 3 – камера технического зрения, 4 – ArUco-маркер

Представленные на рис. 3 модели предполагают различный подход к перемещению АНПА до зарядной станции. В рис. а аппарат перемещается в горизонтальном направлении, а в рис. б – в вертикальном. Геометрическая схема а позволяет варьировать расстояние между камерой системы технического зрения и маркером в широком диапазоне, что позволяет использовать камеру практически с любым углом обзора и фокусным

расстоянием. Благодаря этому данный вариант размещения систем также обеспечивает использование маркера большого размера, что улучшает его распознавание на значительном расстоянии. В модели б существенным недостатком является зависимость расстояния между камерой и маркером от расстояния между приемной и передающей частями БСПЭ, что накладывает ограничения на размеры маркера и параметры камеры. Для распознавания маркера и последующего расчета относительного расположения и ориентации необходимо, чтобы маркер полностью помещался на изображении. При этом, чем меньше расстояние между приемной и передающей частью БСПЭ, тем выше эффективность передачи энергии. Соответственно, геометрическая схема б требует либо поиска компромисса между расстоянием от АНПА до зарядной станции, при котором маркер будет распознан и передача энергии будет происходить с приемлемой эффективностью, либо применения особых конструктивных решений зарядной станции. Исходя из перечисленных достоинств и недостатков предложенных моделей совместного размещения БСПЭ и технического зрения на АНПА и зарядной станции, технически более удачной является модель, представленная на рис. 3, а).

Контролируемые параметры БСПЭ

В качестве параметра БСПЭ для оценки качества позиционирования возможно использовать величину выходного напряжения приемной части системы после выпрямителя, которая имеет прямую зависимость от ЭДС, индуцированной в приемной катушке БСПЭ, а также проста для измерений системой управления АНПА. ЭДС, индуцируемая в приемной катушке, в значительной степени зависит от расстояния и смещений между передающей и приемной частями системы [34], а также от тока нагрузки. На рис. 4 показаны зависимости выходного напряжения приемной части прототипа БСПЭ, представленного в [35], от расстояния между частями системы при различных значениях тока нагрузки. Для удобства значения напряжения выражены в относительных единицах от максимального выходного напряжения БСПЭ.

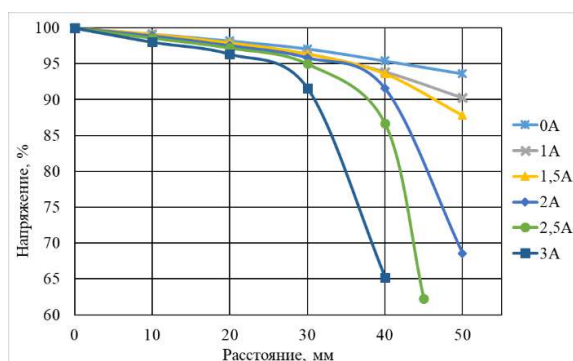


Рис. 4. Зависимости выходного напряжения БСПЭ от расстояния передачи энергии и тока нагрузки

Из графиков на рис. 4 следует, что при отсутствии нагрузки напряжение приемной части системы изменяется незначительно, менее чем на 7% при изменении расстояния на 50 мм. Аналогичен вид кривых при токе нагрузки до 1,5 А. При токе нагрузки

2 А и более зависимость выходного напряжения приемной части системы имеет более выраженный характер. Изменение расстояния от 40 до 50 мм при токе нагрузки 2 А приводит к изменению выходного напряжения более чем на 20%. Аналогична форма кривых для токов нагрузки 2,5 и 3 А, при этом при дистанции передачи энергии более 30 мм выходное напряжение значительно снижается.

Результаты анализа кривых, представленных на рис. 4, показывают, что оценка качества позиционирования с использованием только значения выходного напряжения приемной части БСПЭ невозможна. При различном токе нагрузки и одинаковой дистанции передачи энергии значение выходного напряжения будет отличаться, что не позволяет выбрать одно пороговое значение для работы алгоритма, при котором система может приостановить процесс позиционирования. Необходимо отметить, что при заряде аккумуляторных батарей мощность, потребляемая контроллером заряда, будет меняться, значит, будет меняться и ток, отдаваемый приемной частью системы. Из этого следует, что для оценки качества позиционирования, исходя из рабочих параметров БСПЭ, необходимо использовать одновременно значение выходного напряжения и тока приемной части.

Характеристики прототипа БСПЭ, представленного в работе [35], позволяют вывести неравенство для расчета пороговых значений выходного напряжения на основе значений тока нагрузки. Наиболее широкий диапазон токов и напряжений получен при передаче энергии на расстояние 15 мм, что продемонстрировано в таблице 1. Значения напряжения (U), тока (I) и мощности (P) с индексом «1» относятся к передающей части системы, а с индексом «2» – к приемной.

Для упрощения последующей адаптации и применения полученных результатов, приведенные в таблице значения тока и напряжения переведены в относительные единицы. Используя пакет программ для решения задач вычислений, преобразованные данные были аппроксимированы полиномом второго порядка. График полученной функции представлен на рис. 5.

Кривая на рис. 5 разделяет область рабочих параметров БСПЭ на две части. Если значение напряжения находится ниже кривой при заданном

значении тока, то для повышения эффективности передачи энергии необходимо улучшать качество позиционирования АНПА. Следовательно, для оценки качества позиционирования АНПА относительно БСПЭ на основе рабочих параметров возможно использовать неравенство (1).

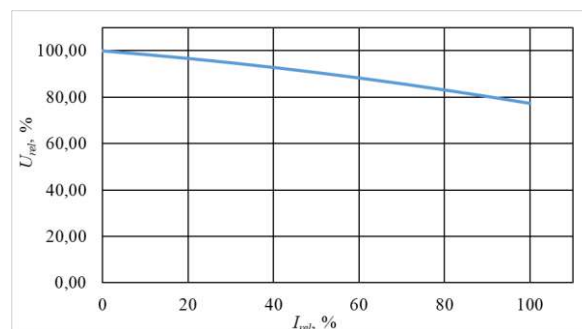


Рис. 5. Зависимости выходного напряжения БСПЭ от тока нагрузки в относительных единицах

$$U_{rel} \geq -0,0008 \cdot I_{rel}^2 - 0,1466 \cdot I_{rel} + 99,905, \quad (1)$$

где $I_{rel} = I_{out} / I_{max} \cdot 100\%$, $U_{rel} = U_{out} / U_{max} \cdot 100\%$, I_{out} – значение тока нагрузки, U_{out} – значение выходного напряжения, I_{max} – максимальное значение тока нагрузки для используемой БСПЭ, U_{max} – максимальное значение выходного напряжения для используемой БСПЭ.

Если неравенство (1) соблюдается, то позиционирование приемной части системы относительно передающей выполнено достаточно точно, и передача энергии идет с высокой эффективностью. Неравенство (1) выведено на основе экспериментальных данных, полученных при тестировании прототипа БСПЭ, построенного на основе структурных и схмотехнических решений, изложенных в [35]. Ранее проведенные исследования показали, что ЭДС, индуцированная в приемной катушке БСПЭ, зависит также от вида и размеров приемной и передающей катушек. Таким образом для систем БСПЭ, имеющих иные конструктивные, структурные и схмотехнические решения, данное неравенство потребует корректировки коэффициентов или вывода аналогичным образом, исходя из рабочих характеристик системы.

Таблица 1

Рабочие параметры прототипа БСПЭ

U_1 , В	I_1 , А	U_2 , В	I_2 , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	Эффективность, %
19,67	1,40	19,55	0,00	26,78	0,00	0,00
19,49	2,81	19,00	1,50	54,01	28,50	52,77
19,30	4,19	18,39	3,00	80,11	55,17	68,87
19,11	5,60	17,65	4,50	106,26	79,43	74,75
18,95	6,90	16,90	6,00	130,00	101,40	78,00
18,78	8,13	16,10	7,50	151,92	120,75	79,48
18,67	8,80	15,47	8,50	163,54	131,50	80,41
18,60	9,06	14,94	9,00	167,76	134,46	80,15

Алгоритм динамического позиционирования АНПА

С учетом предложенных решений по контролируемым рабочим параметрам БСПЭ был разработан алгоритм позиционирования АНПА, представленный на рис. 6.



Рис. 6. Блок-схема алгоритма динамического позиционирования АНПА

На первом этапе алгоритма активируется режим перемещения АНПА в направлении зарядной станции. Данный процесс зависит от применяемых алгоритмов построения траектории и методов глобального перемещения АНПА.

На последующих этапах обрабатываются изображения, получаемые с камеры. Сперва захватывается изображение с камеры, затем полученные данные передаются блоку распознавания маркера на изображении. Задача распознавания ArUco-маркера решается посредством библиотеки OpenCV, которая позволяет распознавать данные маркеры на изображении и вычислять их пространственные характеристики посредством методов, представленных в [36]. Если маркер, расположенный на зарядной станции, не распознан, то АНПА продолжит движение к зарядной станции, то есть произойдет возврат к первому этапу алгоритма. Если маркер распознан, то на следующих этапах алгоритма вычисляются пространственные характеристики ArUco-маркера и с помощью рассчитанных значений производится корректирование положения и ориентации АНПА относительно маркера. При этом АНПА продолжит перемещение к зарядной станции до тех пор, пока не будет определена передающая часть БСПЭ. Детектирование передающей части системы основано на измерении выходного напряжения приемной части, установленной в АНПА. Если измеренное значение напряжения ниже заданной пороговой величины, то считается, что передающая

часть БСПЭ не определена, и повторяются все этапы алгоритма, начиная с блока захвата изображения с камеры. В предложенном алгоритме принято, что процесс заряда аккумуляторной батареи начинается после определения передающей части БСПЭ. После начала процесса заряда производится измерение рабочих параметров БСПЭ. С учетом измеренных параметров проверяется соблюдение условия (1). Если данное условие не соблюдается, то процесс позиционирования продолжается и снова выполняются блоки алгоритма, начиная с блока захвата изображения. Если условие (1) соблюдается, то позиционирование останавливается и продолжается заряд аккумулятора. В случае выхода рабочих параметров за допустимые пределы и соответственно несоблюдения условия (1) происходит повторное выполнение блоков, отвечающих за позиционирование АНПА с помощью системы технического зрения. Когда уровень заряда аккумулятора достигает заданного максимального значения, выполнение алгоритма завершается. Необходимо отметить, что заряд аккумулятора АНПА не прекращается во время позиционирования и происходит все время, пока АНПА находится в рабочей зоне БСПЭ. Динамическое позиционирование АНПА позволяет повысить эффективность передачи энергии и компенсировать смещение аппарата относительно передающей части БСПЭ ввиду течения воды и иных факторов.

Эксперименты

На рис. 7 приведено изображение сцены из среды моделирования, которая использовалась для имитации процесса позиционирования АНПА при заряде аккумуляторной батареи.

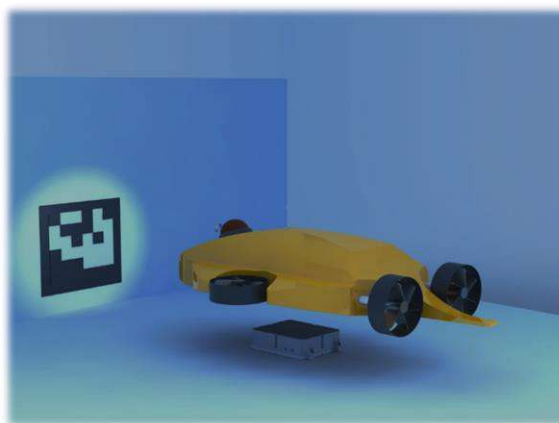


Рис. 7. Позиционирование АНПА по ArUco-маркеру в среде моделирования Gazebo

Аппарат в соответствии с [37] относится к малым по мощности системы электроснабжения и легким по массе, и имеет положительную плавучесть. Модель АНПА имеет четыре гребных винта, два из которых отвечают за погружение, а два других за маневрирование в горизонтальной плоскости. В передней части корпуса АНПА установлена камера для получения изображений, необходимых для поиска ArUco-маркера и позиционирования аппарата относительно него.

Процесс заряда начинается после прибытия АНПА к зарядной станции. В разработанной модели уровень остаточного заряда аккумуляторной батареи

у прибывшего аппарата составляет 20%, а его энергоёмкость равна 65 Вт·ч. Также принято, что в идеальных условиях, то есть в отсутствии течения, а, соответственно, и смещений АНПА относительно зарядной станции, заряд батареи с 0 до 100% происходит за 1 час. При этом характеристика заряда аккумуляторной батареи линейная при постоянной мощности заряда, а максимальная мощность, ограниченная контроллером заряда, составляет 65 Вт. Допускается, что в аккумуляторной батарее отсутствуют потери энергии.

Принято, что компенсация линейных отклонений АНПА относительно передающей части БСПЭ выполняется со статической ошибкой, прямо пропорциональной скорости течения. Также допускается, что статическая ошибка составляет 0,03 м при скорости течения 0,3 м/с. Данное значение скорости подводного течения принято за максимальное. Кроме того, принято, что при скорости течения 0,3 м/с приводы гребных винтов АНПА для компенсации смещения суммарно потребляют мощность 200 Вт, при этом данное значение является максимально возможным. Диаметр катушек БСПЭ равен 160 мм, максимальная передаваемая мощность задана значением 130 Вт. Максимальная эффективность работы БСПЭ принята 80,41% в соответствии с [35].

Возможно два варианта течения процесса заряда батареи, которые зависят от мощности, потребляемой электроприводами АНПА для компенсации отклонений по положению, а также от передаваемой мощности БСПЭ. Первый вариант – передаваемая мощность меньше или равна потребляемой приводами. В этом случае батарея аппарата не заряжается, ее заряд по необходимости расходуется для питания приводов. Второй вариант возникает в случае, когда передаваемая мощность БСПЭ выше мощности, расходуемой приводами гребных винтов. В этом случае часть передаваемой мощности расходуется на электроприводы, оставшаяся часть запасается в аккумуляторе. При этом, как отмечено выше, мощность, расходуемая на заряд батареи, не превышает 65 Вт. Соответственно, если потенциальная передаваемая мощность БСПЭ для данного взаимного положения больше, чем суммарная мощность, расходуемая на компенсацию смещений и заряд батареи, то эффективность системы рассчитывается именно для мощности, потребляемой аппаратом. Таким образом модель учитывает эффективность системы в соответствии с системами уравнений, предложенными в [34].

В среде моделирования была проведена серия экспериментов, направленная на имитацию процесса заряда аккумуляторной батареи АНПА с использованием разработанного подхода. Как следует из раздела с постановкой задачи, динамика рассматриваемого подводного аппарата и система управления позиционированием не входят в рамки проводимого исследования. Вопросы динамики и управления АНПА рассматриваются в работах [38], [39] и ряде других исследований, результаты которых возможно использовать совместно с предлагаемым подходом. Эксперименты проводились при наличии подводного течения, направление и скорость которого относительно аппарата менялось случайным образом. Направление течения относительно горизонтальной оси также изменялось

случайным образом в диапазоне углов от 0° до 30°. Изменение уровня заряда аккумулятора с течением времени определялось на основании расчетных значений эффективности передачи энергии, а также суммарной мощности потребления электроприводов, которая зависит от скорости течения. На рис. 8 приведены кривые процессов заряда при различных значениях, ограничивающих случайную величину скорости течения. На графике также отображена линия, которая показывает процесс заряда при идеальных условиях, а именно при постоянной мощности заряда 65 Вт.

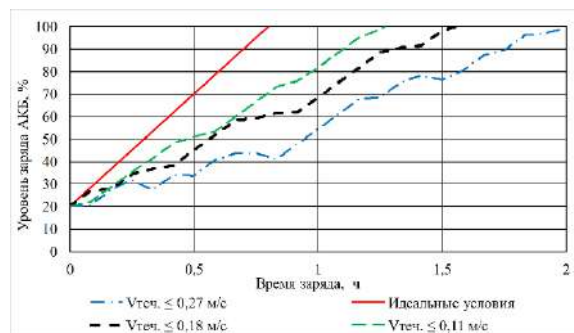


Рис. 8. Графики заряда аккумуляторной батареи при различных скоростях течения

Из рис. 8 следует, что чем больше максимальная скорость течения, тем больше времени требуется на заряд аккумулятора при параметрах БСПЭ, заложенных в модель. Для удобства сравнения результатов экспериментов вычислены средние значения скорости течения ($V_{ср.теч}$), эффективности ($\eta_{ср}$) и скорости заряда ($V_{ср.зар}$). Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения параметров в экспериментах

$V_{теч}$, м/с	$V_{ср.теч}$, м/с	$\eta_{ср}$, %	$V_{ср.зар}$, %/ч	Время заряда, ч
0	0	80,41	100	0,8
$\leq 0,11$	0,049	67,70	62,17	1,28
$\leq 0,18$	0,064	67,10	51,94	1,54
$\leq 0,27$	0,09	65,94	39,9	2

Из таблицы выше следует, что наличие подводного течения снижает эффективность передачи энергии на 12-15%. При этом средняя эффективность для различной скорости течения меняется незначительно на 0,6-1,76%. Время заряда имеет значительную зависимость от скорости течения из-за расхода энергии приводами гребных винтов при компенсации смещений АНПА относительно передающей части БСПЭ.

Заключение

Результаты анализа существующих алгоритмов позиционирования АНПА показали актуальность разработки алгоритма, комплексизирующего рабочие параметры БСПЭ и данные с системы технического зрения для реализации динамического позиционирования АНПА в процессе беспроводного заряда аккумуляторной батареи. В работе проведен анализ и представлены геометрические схемы

размещения БСПЭ и камеры системы технического зрения на АНПА и зарядной станции. Разработан алгоритм, обеспечивающий позиционирование с точностью, соответствующей попаданию выходного напряжения приемной части БСПЭ в заданный диапазон. Функционирование представленного алгоритма динамического позиционирования АНПА в окрестностях передающей части БСПЭ основано на распознавании и вычислении пространственных характеристик ArUco-маркера. Предложенное решение позволяет осуществлять позиционирование исходя из параметра, который является важным именно для передачи энергии и связан с эффективностью данного процесса. Для апробации предложенного подхода разработана модель и проведен ряд экспериментов. На основе результатов экспериментов рассчитаны средние значения

скорости заряда батареи и эффективности передачи энергии в зависимости от средней скорости течения. При течении, направление которого меняется случайным образом, а скорость не превышает 0,27 м/с, эффективность передачи энергии падает менее чем на 15%. При заложенных в модель параметрах БСПЭ и АНПА время заряда аккумуляторной батареи увеличивается в 2,5 раза при средней скорости течения 0,09 м/с по сравнению со временем заряда при отсутствии течения.

Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию предложенных решений в АНПА и проведение экспериментов, направленных на апробацию разработанного алгоритма динамического позиционирования в реальных условиях

Литература

1. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах, матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах", Ростов-на-Дону, 2019, С. 91-105.
2. Guo J., Zheng R., Yu X., Wei A., Yang B. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission, 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation 2018 (WRC SARA), P. 1-6. doi:10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.
3. Yang C., Lin M., Li D. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, Vol. 45(2), P. 430-441. doi:10.1109/JOE.2018.2872449.
4. Yang C., Peng S., Fan S., Zhang S., Wang P., Chen Y. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents, Ocean Engineering, 2016, Vol. 125. P. 170-181. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.08.002.
5. Teeneti C.R., Truscott T.T., Beal D.N., Pantic Z. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, Vol. 46(1), P. 68-87. doi:10.1109/JOE.2019.2953015.
6. Филиппов Б.И. Архитектура гидроакустической навигационной системы с короткой базой для приведения подводного аппарата к стыковочному модулю, Мехатроника, автоматизация, управление, 2019, Т. 20(3), С. 152-161. doi:10.17587/mau.20.152-161.
7. Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Underwater Visual Navigation Method Based on Multiple ArUco Markers, Journal of Marine Science and Engineering, 2021, Vol. 9(12), P. 1432. doi:10.3390/jmse9121432.
8. Martínez-Barberá H., Bernal-Polo P., Herrero-Pérez D. Sensor Modeling for Underwater Localization Using a Particle Filter, Sensors, 2021, Vol. 21(4), P. 1549. doi:10.3390/s21041549.
9. Batista P., Silvestre C., Oliveira P. A sensor-based controller for homing of underactuated AUVs, IEEE transactions on robotics, 2009, Vol. 25(3), P. 701-716. doi:10.1109/TRO.2009.2014496.
10. Bénet P., Novella F., Ponchart M., Bossier P., Clement B. State-of-the-art of standalone accurate AUV positioning- Application to high resolution bathymetric surveys, OCEANS 2019-Marseille, 2019, P. 1-10. doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867041.
11. Eustice R.M. Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, Falmouth, MA, USA. 2005.
12. Kim A., Eustice R.M. Real-time visual SLAM for autonomous underwater hull inspection using visual saliency, IEEE Trans. Robot, 2013, Vol. 29, P. 719-733. doi:10.1109/TRO.2012.2235699.
13. Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Integrated Visual Odometry System for Underwater Vehicles, IEEE J. Ocean. Eng., 2020, Vol. 46, P. 844-863. doi:10.1109/JOE.2020.3036710.
14. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system, Ocean Engineering, 2021, Vol. 224, P. 108744. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.108744.
15. dos Santos Cesar D.B., Gaudig C., Fritsche M., dos Reis M.A., Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments, OCEANS 2015-Genova, 2015, P. 1-6. doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.
16. Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Detecting square markers in underwater environments, Remote Sensing, 2019, Vol. 11(4), 459 p. doi:10.3390/rs11040459.
17. Žuži M., Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Impact of dehazing on underwater marker detection for augmented reality, Frontiers in Robotics and AI, 2018, Vol. 5, P. 92. doi:10.3389/frobt.2018.00092.
18. Chavez A.G., Mueller C.A., Doernbach T., Birk A. Underwater navigation using visual markers in the context of intervention missions, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, Vol. 16(2), P. 1729881419838967. doi:10.1177/1729881419838967.
19. Yan Z., Gong P., Zhang W., Li Z., Teng Y. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array, IEEE Access, 2019, Vol. 7, P. 72567-72576. doi:10.1109/ACCESS.2019.2917791.
20. Eren F., Pe'eri S., Thein M.W., Rzhanov Y., Celikkol B., Swift M.R. Position, orientation and velocity detection of unmanned underwater vehicles (UUVs) using an optical detector array, Sensors, 2017, Vol. 17(8), P. 1741. doi:10.3390/s17081741.

21. Casey T., Guimond B., Hu J. Underwater vehicle positioning based on time of arrival measurements from a single beacon, *OCEANS 2007*, P. 1-8. doi:10.1109/OCEANS.2007.4449186.
22. Eren F., Pe'eri S., Rzhanov Y., Thein M.W., Celikkol B. Optical detector array design for navigational feedback between unmanned underwater vehicles (UUVs), *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, Vol. 41(1), P. 18-26. doi:10.1109/JOE.2015.2389592.
23. Zhang W., Wang X., Gao L., Wei S. UUV-Six Degrees of Freedom Positioning Method Based on Optical Vision, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer, Cham, 2017, P. 779-789. doi:10.1007/978-3-319-65289-4_72.
24. Zhong L., Li D., Lin M., Lin R., Yang C. A fast binocular localisation method for AUV docking, *Sensors*, 2019, Vol. 19(7), P. 1735. doi:10.3390/s19071735.
25. Zhang T., Li D., Yang C. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock, *Ocean engineering*, 2017, Vol. 130, P. 176-187. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.12.002.
26. Ерашов А.А., Камынин К.В., Крестовников К.Д., Савельев А.И. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами, *Информатика и автоматизация*, 2021, Т. 20(6), С. 1279-1306. doi:10.15622/ia.20.6.4.
27. Yang C., Wang T., Chen Y. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform, *IET Power Electronics*, 2019, Vol. 12(8), P. 2108-2117. doi:10.1049/iet-pel.2018.5663.
28. Ogiwara M., Ebihara T., Mizutani K., Wakatsuki N. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles, *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*, 2015, P. 1-5. doi:10.23919/OCEANS.2015.7404400.
29. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., et al. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean, *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, 2016, P. 177-180. doi:10.1109/auv.2016.7778668.
30. Shi J.G., Li D.J., Yang C.J. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications, *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 2014, Vol. 15(1), P. 51-62. doi:10.1631/jzus.C1300171.
31. Cai C., Zhang Y., Wu S., Liu J., Zhang Z., Jiang L. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, P. 65432-65442. doi:10.1109/ACCESS.2020.2984530.
32. Carreras M., Hernández J.D., Vidal E., Palomeras N., Ribas D., Ridaio P. Sparus II AUV—A hovering vehicle for seabed inspection, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, Vol. 43(2), P. 344-355. doi:10.1109/JOE.2018.2792278.
33. Tsukioka S., Aoki T., Yamamoto I., et al. Results of a long distance experiment with the AUV "Urashima", *Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04*, 2004, Vol. 3, P. 1714-1719. doi:10.1109/OCEANS.2004.1406383.
34. Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils, *Electromechanics and Robotics*, Springer, Singapore, 2022, P. 359-369. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_31.
35. Крестовников К.Д., Быков А.Н., Ерашов А.А. Структура и схемотехническое решение системы беспроводной передачи энергии для применения в мобильных РТК, *Робототехника и техническая кибернетика*, 2021, Т. 9(3), С. 196-206. doi:10.31776/RTCJ.9305.
36. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, 2014, Vol. 47(6), P. 2280-2292. doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005.
37. ГОСТ Р 56960-2016. Аппараты необитаемые подводные. Классификация.
38. Туркин И.И., Крятов А.Ю., Хеин М. Система автоматического оптимального управления пространственным движением автономного необитаемого аппарата типа глайдер, *Морские интеллектуальные технологии*, Т. 1(2), 2016, С. 52-58.
39. Сакович С. Ю., Сиек Ю.Л. Позиционное управление движением необитаемого подводного аппарата по видеоинформации при осмотре подводного трубопровода, *Морские интеллектуальные технологии*, Т. 1(2), 2018, С. 127-133.

References

1. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of lightweight interventional autonomous unmanned underwater vehicle for use in underwater residential systems]. *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"*, Rostov-na-Donu, 2019, P. 91-105. (In Russian).
2. Guo J., Zheng R., Yu X., Wei A., Yang B. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission. In *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation 2018 (WRC SARA)*, P. 1-6. doi:10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.
3. Yang C., Lin M., Li D. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, Vol. 45(2), P. 430-441. doi:10.1109/JOE.2018.2872449.
4. Yang C., Peng S., Fan S., Zhang S., Wang P., Chen Y. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents. *Ocean Engineering*, 2016, Vol. 125, P. 170-181. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.08.002.
5. Teeneti C.R., Truscott T.T., Beal D.N., Pantic Z. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, Vol. 46(1), P. 68-87. doi:10.1109/JOE.2019.2953015.

6. Filippov B.I. *Arkhitektura gidroakusticheskoy navigatsionnoy sistemy s korotkoy bazoy dlya privedeniya podvodnogo apparata k stykovochnomu modulyu* [Architecture of a Hydroacoustic Navigation System with a Cotton Basis for Conversion of the Underwater Apparatus to the Docking Module]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, Vol. 20(3), P. 152-161. (In Russian). doi:10.17587/mau.20.152-161.
7. Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Underwater Visual Navigation Method Based on Multiple ArUco Markers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9(12), P. 1432. doi:10.3390/jmse9121432.
8. Martínez-Barberá H., Bernal-Polo P., Herrero-Pérez D. Sensor Modeling for Underwater Localization Using a Particle Filter. *Sensors*, 2021, Vol. 21(4), P. 1549. doi:10.3390/s21041549.
9. Batista P., Silvestre C., Oliveira P. A sensor-based controller for homing of underactuated AUVs. *IEEE transactions on robotics*, 2009, Vol. 25(3), P. 701-716. doi:10.1109/TRO.2009.2014496.
10. Bénéf P., Novella F., Ponchart M., Bossier P., Clement B. State-of-the-art of standalone accurate AUV positioning- Application to high resolution bathymetric surveys. In *OCEANS 2019-Marseille*, 2019, P. 1-10. doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867041.
11. Eustice R.M. *Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles*. Ph.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, Falmouth, MA, USA. 2005.
12. Kim A., Eustice R.M. Real-time visual SLAM for autonomous underwater hull inspection using visual saliency. *IEEE Trans. Robot.*, 2013, Vol. 29, P. 719-733. doi:10.1109/TRO.2012.2235699.
13. Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Integrated Visual Odometry System for Underwater Vehicles. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2020, Vol. 46, P. 844-863. doi:10.1109/JOE.2020.3036710.
14. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system. *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 224, P. 108744. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.108744.
15. dos Santos Cesar D.B., Gaudig C., Fritsche M., dos Reis M.A., Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. In *OCEANS 2015-Genova*, 2015, P. 1-6. doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.
16. Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Detecting square markers in underwater environments. *Remote Sensing*, 2019. Vol. 11(4), P. 459. doi:10.3390/rs11040459.
17. Žuži M., Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Impact of dehazing on underwater marker detection for augmented reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 2018, Vol. 5, P. 92. doi:10.3389/frobt.2018.00092.
18. Chavez A.G., Mueller C.A., Doernbach T., Birk A. Underwater navigation using visual markers in the context of intervention missions. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, Vol. 16(2), P. 1729881419838967. doi:10.1177/1729881419838967.
19. Yan Z., Gong P., Zhang W., Li Z., Teng Y. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, P. 72567-72576. doi:10.1109/ACCESS.2019.2917791.
20. Eren F., Pe'eri S., Thein M.W., Rzhanov Y., Celikkol B., Swift M.R. Position, orientation and velocity detection of unmanned underwater vehicles (UUVs) using an optical detector array. *Sensors*, 2017, Vol. 17(8), P. 1741. doi:10.3390/s17081741.
21. Casey T., Guimond B., Hu J. Underwater vehicle positioning based on time of arrival measurements from a single beacon. In *OCEANS*, 2007, P. 1-8. doi:10.1109/OCEANS.2007.4449186.
22. Eren F., Pe'eri S., Rzhanov Y., Thein M.W., Celikkol B. Optical detector array design for navigational feedback between unmanned underwater vehicles (UUVs). *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, Vol. 41(1), P. 18-26. doi:10.1109/JOE.2015.2389592.
23. Zhang W., Wang X., Gao L., Wei S. UUV-Six Degrees of Freedom Positioning Method Based on Optical Vision. In *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer, Cham, 2017, P. 779-789. doi:10.1007/978-3-319-65289-4_72.
24. Zhong L., Li D., Lin M., Lin R., Yang C. A fast binocular localisation method for AUV docking. *Sensors*, 2019, Vol. 19(7), P. 1735. doi:10.3390/s19071735.
25. Zhang T., Li D., Yang C. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock. *Ocean engineering*, 2017, Vol. 130, P. 176-187. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.12.002.
26. Erashov A., Kamynin K., Krestovnikov K., Saveliev A. *Metod otsenki vremeni besprovodnoy peredachi energeticheskikh resursov mezhdv dvumya robotami* [Method for Estimating Time of Wireless Transfer of Energy Resources Between Two Robots]. *Informatics and Automation*. 2021, Vol. 20(6), P. 1279-1306. (In Russian). doi:10.15622/ia.20.6.4.
27. Yang C., Wang T., Chen Y. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform. *IET Power Electronics*, 2019, Vol. 12(8), P. 2108-2117. doi:10.1049/iet-pel.2018.5663.
28. Ogiwara M., Ebihara T., Mizutani K., Wakatsuki N. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles. In *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*, 2015, P. 1-5. doi:10.23919/OCEANS.2015.7404400.
29. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., et al. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean. In *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, 2016, P. 177-180. doi:10.1109/auv.2016.7778668.
30. Shi J.G., Li D.J., Yang C.J. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 2014, Vol. 15(1), P. 51-62. doi:10.1631/jzus.C1300171.
31. Cai C., Zhang Y., Wu S., Liu J., Zhang Z., Jiang L. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, P. 65432-65442. doi:10.1109/ACCESS.2020.2984530.

32. Carreras M., Hernández J.D., Vidal E., Palomeras N., Ribas D., Ridaio P. Sparus II AUV—A hovering vehicle for seabed inspection. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, Vol. 43(2), P. 344-355. doi:10.1109/JOE.2018.2792278.
33. Tsukioka S., Aoki T., Yamamoto I., et al. Results of a long distance experiment with the AUV "Urashima". In *Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04*, 2004, Vol. 3, P. 1714-1719. doi:10.1109/OCEANS.2004.1406383.
34. Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils. In *Electromechanics and Robotics*, Springer, Singapore, 2022, P. 359-369. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_31.
35. Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. *Struktura i skhemye resheniya dlya primeneniya v mobil'nykh RTK [Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems]*. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2021. Vol. 9(3), P. 196-206. (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.9305.
36. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 2014, Vol. 47(6), P. 2280-2292. doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005.
37. GOST R 56960-2016. *Apparaty neobitaemye podvodnye. Klassifikatsiya*. [Unmanned Underwater Vehicles. Classification].
38. Ivanovich T. I., Yurevich K. A., Hein M. *Sistema avtomaticheskogo optimal'nogo upravleniya prostranstvennym dvizheniem avtonomnogo neobitaemogo apparata tipa glajder [Automatic optimal control system of spatial motion of autonomous underwater vehicle for type glider]*. *Marine Intellectual Technologies*, 2016, Vol. 1(2), P. 52-28.
39. Sakovich S. Y., Siek Y. L. *Pozicionnoe upravlenie dvizheniem neobitaemogo podvodnogo apparata po videoinformatsii pri osmotre podvodnogo truboprovoda [Position based motion control of the underwater vehicle on video data at the underwater pipeline inspection]*. *Marine Intellectual Technologies*, 2018, Vol. 2(1), P. 127-133.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Константин Дмитриевич Крестовников, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Konstantin D. Krestovnikov, graduate student, junior researcher of the laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS, 199178, Saint Petersburg, 14-th Line V.O., 39, e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Алексей Алексеевич Ерашов, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социобиофизических систем, СПб ФИЦ РАН, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: erashov.a@iias.spb.su

Aleksei A. Erashov, graduate student, junior researcher of the laboratory of big data technologies in sociocyberphysical systems, SPC RAS, 199178, Saint Petersburg, 14-th Line V.O., 39, e-mail: erashov.a@iias.spb.su

Антон Игоревич Савельев, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автономных робототехнических систем, старший научный сотрудник, СПб ФИЦ РАН, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: saveliev@iias.spb.su

Anton I. Saveliev, Ph.D. (Eng), head of the laboratory of autonomous robotic systems, senior researcher, SPC RAS, 199178, Saint Petersburg, 14-th Line V.O., 39, e-mail: saveliev@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 28.11.2022.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 681.883: 519.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.037>

Вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе

С.Б. Егоров¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Р.И. Горбачев¹ gorbatschow.r@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. На основе «выбросовой» физической модели работы автоматического обнаружителя в режиме ожидания сигнала, когда ложное срабатывание ассоциируется с появлением «ложного выброса» помехового индикаторного процесса выше уровня обнаружения, разработана вероятностная «выбросовая» модель работы двухпорогового обнаружителя, – обнаружителя с порогами по уровню и длительности, в режиме ожидания сигнала. Модель разработана в приближении независимости вероятностных характеристик длительности ложных выбросов от числа выбросов на интервале ожидания. С помощью вероятностной модели и использования функций распределения вероятностей нормального стационарного случайного процесса на конечном отрезке времени получена вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе с нормализованным индикаторным процессом. Показано, что требуемая вероятность ложной тревоги на интервале ожидания может быть обеспечена за счет порога по длительности даже при нулевом относительном пороге обнаружения по уровню.

Ключевые слова: режим ожидания сигнала, ложная тревога на интервале ожидания, вероятностная характеристика ожидания, двухпороговый обнаружитель.

Для цитирования: Егоров С.Б., Горбачев Р.И., Вероятностная характеристика ожидания сигнала в двухпороговом обнаружителе, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 156—161.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.037>

Probability function of waiting for double threshold detector

Stanislav B. Egorov¹ Stanislav.Egorov.1938@gmail.com, Roman I. Gorbachev¹ gorbatschow.r@gmail.com

¹State-marine technical university of Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article proposes a probability function of waiting based on «emissional» physical model of automatic detector working in standby mode, when the false actuation of detector is associated with emerging of false alarm of noise indicator process. It is supposed that detector has a double threshold structure which means threshold by time after threshold by level. Such detector works online in standby (signal waiting) mode. Proposed model is developed on the assumption that probability functions of false actuations duration are independent from the total actuations on the waiting interval. Using a probabilistic model and a probability functions of normal stationary process we got the probability function of signal waiting for double threshold detector with normalized indicator process. Also it is shown that the required false alarm probability on the entire waiting interval can be provided only with time threshold even with zero relative level threshold.

Keywords: standby mode, false alarm on the waiting interval, probability function of waiting, double threshold detector.

For citation: Stanislav B. Egorov, Roman I. Gorbachev, Probability function of waiting for double threshold detector, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 156—161.

Введение

Работа автоматического обнаружителя начинается с режима ожидания сигнала, когда на обнаружитель воздействуют только помехи. Длительность времени ожидания – величина случайная, неизвестная, но всегда известно максимально возможное время ожидания – «интервал ожидания».

Согласно критерию Неймана-Пирсона, порог обнаружения определяется по заданной вероятности ложной тревоги. Допустимые значения либо вероятности, либо средней частоты, либо среднего числа ложных срабатываний, задаются именно на интервале ожидания. Однако, к сожалению, до сих

пор при определении порога обнаружения по заданной вероятности ложной тревоги традиционного используется одномерная плотность вероятности помехового индикаторного процесса, т.е. его текущего значения в фиксированный момент времени, «в точке» [1] [2] [3] [4] [5].

При такой методике определение порога вероятности ложной тревоги на интервале ожидания приравнивается к вероятности ложной тревоги «в точке». Иными словами, непрерывное повторение процедуры обнаружения на интервале ожидания заменяется обнаружением по единственному отсчету «решающей статистики». Следствием ошибочной методики является занижение порога обнаружения [6].

Устранить эту ошибку можно только одним способом – использовать для определения порога обнаружения зависимость вероятности ложной тревоги не только от порога, но и от длительности интервала ожидания, а также от многомерных вероятностных характеристик помехового индикаторного процесса на интервале ожидания.

Такая зависимость получена на основе «выбросовой» модели работы автоматического обнаружителя в режиме ожидания [6]. Авторы дали название этой зависимости: «вероятностная характеристика ожидания сигнала», подчеркнув ее значимость для обнаружителя наряду с вероятностной характеристикой обнаружения.

Однако полученная в [6]. вероятностная характеристика применима только для достаточно высоких относительных порогов обнаружения

$$k = \frac{U_0 - \mu_{um}}{\sigma_{um}} \geq 3.0.$$

Причина ограничения порога снизу – трактовка «ложных выбросов» (положительных выбросов помехового индикаторного процесса относительно уровня обнаружения U_0) как редких во времени случайных событий. Такая трактовка позволила использовать при вводе вероятностной характеристики ожидания закон редких событий Пуассона [7].

Тот же закон был использован при получении вероятностной характеристики ожидания для обнаружителя с порогом по уровню и длительности для двухпорогового обнаружителя [8]. И у этой характеристики сохранился тот же недостаток – ограничения снизу порога обнаружения по уровню. Это ограничение было полностью снято в вероятностной характеристике ожидания для однопорогового обнаружителя [9], когда к анализу вероятностных свойств ложных выбросов на интервале ожидания была привлечена многомерная вероятностная характеристика случайного процесса – функция распределения вероятностей на конечном отрезке времени [10]. Она и была использована при выводе универсальной вероятностной характеристики ожидания для однопорогового обнаружителя с нормализованным помеховым индикаторным процессом.

Целью настоящей статьи является получение такой же свободной от пороговых ограничений вероятностной характеристики ожидания для двухпорогового обнаружителя. Единственная трудность при достижении этой цели – разработка адекватной вероятностной модели работы двухпорогового обнаружителя в режиме ожидания. Трудность связана с необходимостью привлечения к анализу вероятностей совместного появления двух случайных величин: числа ложных выбросов на интервале ожидания и длительности этих выбросов. Такие вероятности не известны, поэтому при разработке вероятностной модели пришлось пойти на приближение, основанное на предположении о слабой взаимосвязи между этими двумя величинами.

Физическая модель работы автоматического обнаружителя в режиме ожидания сигнала

Работу автоматического обнаружителя в режиме ожидания сигнала рассмотрим на примере

пассивного акустического обнаружителя автономной станции подводного наблюдения.

После включения питания и окончания этапа адаптации к помехе начинается работа в режиме ожидания сигнала. Момент вхождения движущегося источника шумоизлучения в зону реагирования обнаружителя, т.е. момент появления сигнала, неизвестен, поэтому процедура обнаружения в режиме ожидания осуществляется непрерывно во времени.

Физически это означает, что из шумовой помехи, отфильтрованной и стационаризованной в приемном тракте, формируется непрерывно, суммированием на конечном отрезке времени в режиме «скользящего окна» «решающая статистика» – случайная величина, функционально связанная с отношением правдоподобия.

Текущие значения «решающей статистики» становятся мгновенными значениями случайного стационарного процесса, поступающего на вход индикаторного устройства и называемого «помеховым индикаторным процессом».

Индикаторным устройством является пороговое устройство компараторного типа с порогом чувствительности U_0 – порогом обнаружения. Если на «интервале ожидания», т.е. до появления сигнала, не произойдет ни одного положительного выброса помехового индикаторного процесса относительно уровня U_0 (не произойдет «ложного выброса»), то в момент появления сигнала режим ожидания завершится переходом в режим обнаружения. Если же на интервале ожидания произойдет хотя бы один ложный выброс, то первый из них вызовет срабатывание обнаружителя – «ложную тревогу».

Очевидно, что чем дольше интервал ожидания, тем вероятнее появление ложной тревоги на нем – тем выше вероятность ложной тревоги. Следовательно, порог обнаружения U_0 должен определяться с учетом максимальной протяженности времени ожидания.

До сих пор речь шла о ложных выбросах без учета их длительности. Но часть этих выбросов, коротких по сравнению с длительностью сигнала от движущегося источника шумоизлучения, можно нейтрализовать селекцией по длительности. Иными словами, аппаратно легко обеспечить, чтобы ложную тревогу вызывали только те выбросы, длительность которых достигла или превысила пороговую величину τ_0 – порог обнаружения по длительности.

Введение второго порога усложняет зависимость вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}(T_0)$ от длительности интервала ожидания T_0 и теперь уже двух порогов: от U_0 и τ_0 . Однако «выбросовая» вероятностная модель позволяет определить и эту зависимость.

Вероятностная модель работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала

Вероятностная модель работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала может быть построена на основе серии опытов по наблюдению за появлением ложных выбросов на интервале ожидания сигнала.

Условия проведения всех опытов в серии одинаковы: неизменны параметры помехового индикаторного процесса, уровень порога обнаружения u_0 и длительность интервала ожидания T_0 .

Первоначально полагаем, что результатом отдельного опыта является случайное событие $A(n)$ – появление на T_0 ровно n ложных выбросов любой длительности. При этом, число n может принимать любые нулевое, либо любое целое значение от $n=1$ до $n=n_{\max}$, где под n_{\max} понимается число, вероятность появления которого стремится к нулю. В этих условиях события $A(n)$ несовместны и составляют полную группу. Следовательно, если известна вероятность $P(n)$ появления события $A(n)$, то сумма вероятностей всех событий равна единице [11].

$$\sum_{n=0}^{n_{\max}} P(n) = P(0) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = 1. \quad (1)$$

Здесь $P(0)$ – вероятность непоявления ни одного ложного выброса на T_0 .

Когда ложную тревогу вызывает появление на T_0 хотя бы одного ложного выброса любой длительности, т.е. появление события $A(1)$, или $A(2), \dots$, или $A(n_{\max})$, то вероятность появления ложной тревоги на T_0 определяется соотношением

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = 1 - P(0). \quad (2)$$

Теперь учтем наличие в процедуре обнаружения селекции выбросов по длительности. Разделим случайные события $A(n)$ на подгруппы, учитывая не только число появившихся на T_0 ложных выбросов, но и их длительности τ по отношению к пороговой величине τ_0 .

Выделим три подгруппы событий. В первую включим только событие, нейтральное к длительности выбросов, событие $A(0)$ – непоявление ни одного выброса. Во вторую подгруппу включим события $A(n, \tau < \tau_0)$, каждое из которых состоит в том, что появилось n выбросов и каждый из них оказался по длительности меньше τ_0 . Число выбросов n в этой подгруппе меняется от 1 до n_{\max} . К третьей подгруппе отнесем событие $A(n, \tau \geq \tau_0)$, каждое из которых состоит в том, что появилось n выбросов и при этом, хотя бы один из них оказался по длительности равным или превысившим τ_0 . Число выбросов в этой подгруппе также меняется от 1 до n_{\max} .

События, вошедшие в три подгруппы – несовместимы, а их совокупность составляет полную группу. Введем вероятности этих событий: $P(0)$, $P(n, \tau < \tau_0)$ и $P(n, \tau \geq \tau_0)$ и запишем их сумму равную единице:

$$P(0) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n, \tau < \tau_0) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n, \tau \geq \tau_0) = 1. \quad (3)$$

Очевидно, что появление любого события из 3-ей подгруппы эквивалентно появлению ложной тревоги на T_0 , откуда

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n, \tau \geq \tau_0). \quad (4)$$

Появление события $A(0)$ или любого из второй подгруппы эквивалентно непоявлению ложной тревоги на T_0 , т.е.

$$1 - P_{\text{ЛТ}}(T_0) = P(0) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n, \tau < \tau_0). \quad (5)$$

Используя в (4) теорему умножения вероятностей

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) P\left(\tau \geq \frac{\tau_0}{n}\right), \quad (6)$$

где $P(n)$ – безусловная вероятность того, что хотя бы один из n появившихся выбросов оказался по длительности большим или равен τ_0 , если появилось n выбросов.

Если предположить, что вероятностные характеристики длительности выбросов слабо зависят от их числа на интервале T_0 и этой зависимостью можно пренебречь, то в таком приближении условная вероятность становится безусловной:

$$P\left(\tau \geq \frac{\tau_0}{n}\right) \approx P(\tau \geq \tau_0). \quad (7)$$

В таком приближении формула (6) для $P_{\text{ЛТ}}(T_0)$ принимает вид:

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = P(\tau \geq \tau_0) \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = P(\tau \geq \tau_0)(1 - P(0)). \quad (8)$$

Такой же результат можно получить из (5). Действительно, имеем

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n, \tau < \tau_0) = 1 - P(0) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) P(\tau < \tau_0 | n). \quad (9)$$

Используя приближение

$$P(\tau < \tau_0 | n) \approx P(\tau < \tau_0), \quad (10)$$

получаем из (9) результат (8):

$$\begin{aligned}
 P_{\Lambda T}(T_0) &= 1 - P(0) - \\
 &- P(\tau < \tau_0) \sum_{n=1}^{n_{\max}} P(n) = \\
 &= (1 - P(0)) - (1 - P(\tau < \tau_0)) = \\
 &= (1 - P(0)) P(\tau \geq \tau_0).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Таким образом, вероятность ложной тревоги на интервале ожидания сигнала $P_{\Lambda T}(T_0)$ в обнаружителе с порогом обнаружения только по уровню определяется соотношением

$$P_{\Lambda T}(T_0) = 1 - P(0), \tag{12}$$

а для обнаружителя с порогом обнаружения по уровню и длительности – соотношением

$$P_{\Lambda T}(T_0) = P(\tau \geq \tau_0)(1 - P(0)). \tag{13}$$

Вероятностные характеристика ожидания сигнала в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом

Вероятность $P(0)$ на интервале ожидания T_0 ни одного положительного выброса помехового индикаторного процесса $u_n(t)$ относительно уровня обнаружения u_0 равна вероятности недостижения текущими значениями этого процесса уровня u_0 на этом интервале времени, если в момент начала интервала T_0 значение $u_n(t)$ было ниже u_0 . Вероятность второго события является значением функции распределения вероятностей $F(u_0, T_0)$ случайного процесса $u_n(t)$ на конечном отрезке времени T_0 [10].

Полагаем текущие значения решающей статистики в обнаружителе нормализованными случайными величинами. Тогда процесс $u_n(t)$ – нормальный стационарный.

Полагаем известными три статистических параметра этого процесса: математическое ожидание μ_{un} , среднее квадратическое отклонение σ_{un} и средняя квадратичная частота флюктуаций f_{un} , связанная с нормированной автокорреляцией $R_{un}(\tau)$ соотношением

$$f_{un} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R''_{un}(0)}. \tag{14}$$

Кроме того, полагаем, что алгоритм формирования адаптивного порога обнаружения u_0 определяется соотношением

$$u_0 = \mu_{un} + k\sigma_{un}, \quad k \geq 0, \tag{15}$$

где k – весовой пороговый коэффициент или относительный порог обнаружения

$$k = \frac{u_0 - \mu_{un}}{\sigma_{un}}. \tag{16}$$

При перечисленных условиях функция распределения вероятностей $F(k, T_0)$ текущих значений помехового индикаторного процесса на интервале времени T_0 относительно уровня u_0 определяется выражением [10]:

$$\begin{aligned}
 F(k, T_0) &= \Phi(k) \times \\
 &\times \exp\left(-\frac{f_{un} T_0}{\Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right) = P(0),
 \end{aligned} \tag{17}$$

где

$$\Phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^k \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \tag{18}$$

– интеграл вероятности Лапласа.

Известна также функция плотности вероятности длительности положительных выбросов нормального стационарного процесса $W(\tau, k)$ с параметрами μ_{un} , σ_{un} , f_{un} относительно уровня u_0 [10]:

$$W(\tau, k) = \alpha \exp(-\alpha\tau), \tag{19}$$

где

$$\alpha = \frac{f_{un}}{1 - \Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right). \tag{20}$$

Отсюда, вероятность превышения длительностью ложного выброса пороговой величины τ_0 определяется выражением:

$$\begin{aligned}
 P(\tau \geq \tau_0) &= \int_{\tau_0}^{\infty} W(\tau, k) d\tau = \\
 &= \exp(-\alpha\tau_0) = \\
 &= \exp\left(-\frac{f_{un} \tau_0}{1 - \Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right).
 \end{aligned} \tag{21}$$

По аналогии с относительным порогом по уровню k (16) введем относительный порог обнаружения по длительности x :

$$x = f_{un} \tau_0. \tag{22}$$

Таким образом, для обнаружителей с нормализованным помеховым индикаторным процессом имеем две вероятностные характеристики ожидания сигнала:

- для обнаружителя с порогом только по уровню

$$\begin{aligned}
 P_{\Lambda T}(T_0) &= 1 - \Phi(k) \times \\
 &\times \exp\left(-\frac{f_{un} T_0}{\Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right);
 \end{aligned} \tag{23}$$

- для обнаружителя с порогом по уровню и длительности

$$P_{\text{ЛГ}}(T_0) = \exp\left(\frac{x}{1-\Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right) \times \left(1-\Phi(k) \exp\left(-\frac{f_{\text{ин}} T_0}{\Phi(k)} \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right)\right) \quad (24)$$

Сочетание порогов обнаружения по уровню и длительности

Заданную величину $P_{\text{ЛГ}}(T_0)$ можно обеспечить разными сочетаниями величин порогов по уровню и длительности. Выбор сочетания зависит от поставленной цели. Когда такой целью является высокая точность системы адаптации к помехе с медленной нестационарностью, предпочтительным является порог обнаружения по уровню, равный математическому ожиданию помехового индикаторного процесса

$$u = \mu_{\text{ин}}, \quad (25)$$

т.е. при $k = 0$ согласно (15).

Снятое ограничение на минимум относительного порога обнаружения по уровню k в вероятностной

модели (13) и в вероятностной характеристике ожидания (24) позволяет принять в (24) $k = 0$.

В этом случае

$$\Phi(0) = 1 - \Phi(0) = 0.5,$$

и при максимально возможном относительном времени ожидания $f_{\text{ин}} T_0 \geq 10$ (что всегда выполняется на практике) получаем

$$P_{\text{ЛГ}}(T_0) \approx \exp(-2x) \quad (26)$$

Следовательно, при пороге по уровню (25) требуемая величина $P_{\text{ЛГ}}(T_0)$ обеспечивается порогом по длительности:

– относительным

$$x = 0.5 \ln P_{\text{ЛГ}}^{-1}(T_0); \quad (27)$$

– абсолютным

$$\tau_0 = \frac{1}{2f_{\text{ин}}} \ln(P_{\text{ЛГ}}^{-1}(T_0)), \text{ с.} \quad (28)$$

В таблице 1 приведены значения относительного и абсолютного порогов по длительности при $f_{\text{ин}} = 5$ Гц.

Таблица 1

Значения абсолютного и относительного порогов по длительности

$P_{\text{ЛГ}}(T_0)$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
x	2.3	3.45	4.6
$\tau_0, \text{ с}$	0.46	0.69	0.92

Заключение

Для двухпорогового обнаружителя с нормализованным индикаторным процессом разработана модель работы в приближении независимости вероятностных характеристик длительности ложных выбросов от числа выбросов на интервале ожидания.

С помощью модели и использования функций распределения вероятностей нормального

стационарного случайного процесса на конечном отрезке времени получена вероятностная характеристика ожидания сигнала.

Показано, что требуемая вероятность ложной тревоги на интервале ожидания может быть обеспечена за счет порога по длительности даже при нулевом относительном пороге обнаружения по уровню.

Литература

1. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1973.
2. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. Радио, 1978.
3. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем. Л.: Судостроение, 1988.
4. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Том 1. СПб: "Концерн ЦНИИ Электроприбор", 2009.
5. Белецкий Ю.С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Издательство "Радиотехника", 2011.
6. Егоров С.Б., Горбачёв Р.И. Выбор порога селекции сигнала по уровню в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом // Морские интеллектуальные технологии, Т. 1, № 4(46), 2019.
7. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967.
8. Егоров С.Б., Горбачёв Р.И. Определение порогов селекции по уровню и длительности в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом // Морские интеллектуальные технологии, Т. 2, № 2(48), 2020.
9. Горбачев Р.И. Вероятностная характеристика ожидания сигнала в автоматическом обнаружителе // Морские информационно-измерительные и управляющие системы. СПб, СПбГМТУ. 2021. С. 86-93.
10. Денисекно А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
11. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. 6-е-е изд. М.: Наука, 1988.

References

1. Ol'shevskij V.V. Statisticheskie metody v gidrolokacii. L.: Sudostroenie, 1973.
2. Sosulin Y.G. Teoriya obnaruzheniya i ocenivaniya stoxasticheskix signalov. M.: Sov. Radio, 1978.
3. Burdic W.S. Analiz gidroakusticheskix sistem. L.: Sudostroenie, 1991.

4. Mal'yshkin G.S. Optimal'ny'e i adaptivny'e metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov. SPb: Koncern CzNII "E'LEKTROPRIBOR", 2009.
5. Beletsky Y.S. Metody i algoritmy kontrastnogo obnaruzheniya signalov na fone pomex s apriori neizvestny`mi karakteristikami. M.: Radiotekhnika, 2011.
6. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Vy`bor poroga selekcii signala po urovnyu v obnaruzhitelyax s normalizovanny`m indikatorny`m processom [Threshold of signal level selector in detectors with normalized indicator process] // Morskie Intellektual'ny'e Tekhnologii, Vol. 1, No. 4(46), 2019. pp. 167-171.
7. Hudson D.J. Statistika dlya fizikov. Generva: CERN, 1964.
8. Egorov S.B., Gorbachev R.I. Opredelenie porogov selekcii po urovnyu i dlitel'nosti v obnaruzhitelyax s normalizovanny`m indikatorny`m processom [Determination of level and time thresholds for detectors with normalized indicator process] // Morskie Intellektual'ny'e Tekhnologii, Vol. 2, No. №2(48), 2020. pp. 144-147.
9. Gorbachev R.I. Veroyatnostnaya karakteristika ozhidaniya signala v avtomaticheskom obnaruzhitele // Morskie informacionno-izmeritel'ny'e i upravlyayushhie sistemy`. SPb, SPbGMTU. 2021. pp. 86-93.
10. Denisenko A.N. Signaly`. Teoreticheskaya radiotekhnika. Spravochnoe posobie. [Signals. Theoretical radio engineering. Reference guide]. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2005.
11. Gnedenko B. Kurs teorii veroyatnostej [Probability Theory course]. 6th ed. M.: Nauka, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ О АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Борисович Егоров, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Stanislav B. Egorov, Ph.D. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Роман Игоревич Горбачев, ассистент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Roman I. Gorbachev, graduate student, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 27.10.2022.

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.038>

Расчётная оценка безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива

В.Ю. Каминский¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru,

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. При осуществлении транспортировки отработавшего ядерного топлива в транспортных упаковочных комплексах требуется подтвердить соблюдение требований ядерной и радиационной безопасности, установленных в нормативных документах. Всестороннее обоснование безопасности включает проведение комплекса нетривиальных, трудоёмких расчётов из разных предметных областей физики. Расчётная оценка выполняется в рамках сложных вычислительных кодов (программ), применение которых требует высокой квалификации пользователей, предполагает высокопроизводительную вычислительную технику и, как правило, наличие лицензии на эксплуатацию программного продукта. Очевидно, что процедура принятия решения, в рамках описанной технологии расчётной оценки, занимает значительное время и не всегда доступна. Отчасти указанную проблему решает действующий в настоящее время отраслевой стандарт ОСТ 95 745-2005. В нём для отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реакторов типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 консервативно установлены диапазоны известных характеристик топлива: начальное обогащение, глубина выгорания и т.д., при соответствии которым, требования нормативных документов обеспечиваются безусловно. При этом необходимость в проведении трудоёмких расчётов отпадает, и обоснование безопасности транспортировки ОТВС сводится к подтверждению выполнения требований отраслевого стандарта. Однако, степень консерватизма подобного подхода представляется избыточной. Кроме того, в настоящее время реализуется переход ядерной энергетики с реакторами типа ВВЭР на новые топливные циклы. Этот переход сопровождается ростом начального обогащения и увеличением глубины выгорания топлива. В этом случае характеристики топливных сборок, назначенных к транспортировке, выходят за границы значений, приведённых в нормативном документе, что требует полного расчётного обоснования безопасности перевозки партии ОТВС. Данная проблема требует разработки методологии расчётной оценки безопасности транспортировки, учитывающей, с одной стороны, основные факторы, влияющие на характеристики безопасности, а с другой - реализуемой в рамках достаточно простых вычислительных кодов. В статье приведены основные положения упрощённых методик оценки ядерной и радиационной безопасности транспортировки ОТВС, а также результаты контрольных расчётов.

Ключевые слова: глубина выгорания, методика расчётной оценки, нормативные требования, отработавшие тепловыделяющие сборки, радиационная безопасность, транспортировка, ядерная безопасность.

Для цитирования: Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Расчётная оценка безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 162—169.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.038>

Estimated safety assessment of spent nuclear fuel transportation

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, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. When transporting spent nuclear fuel in transport packages, it is required to confirm compliance with the requirements of nuclear and radiation safety established in regulatory documents. A comprehensive safety justification includes carrying out a complex of non-trivial, time-consuming calculations from different subject areas of physics. The calculation evaluation is carried out within the framework of complex computational codes (programs), the use of which requires highly qualified users, assumes high-performance computing equipment and, as a rule, the availability of a license to operate a software product. It is obvious that the decision-making procedure, within the framework of the described technology of calculation assessment, takes considerable time and is not always available. In part, this problem is solved by the industry standard OST 95 745-2005 currently in force. It conservatively sets ranges of known fuel characteristics for spent fuel assemblies (SFAS) of VVER-440 and VVER-1000 type reactors: initial enrichment, burnout depth, etc., in accordance with which the requirements of regulatory documents are provided unconditionally. At the same time, there is no need for labor-intensive calculations, and the justification for the safety of SFAS transportation is reduced to confirming compliance with the requirements of the industry standard. However, the degree of conservatism of this approach seems excessive. In addition, the transition of nuclear power with VVER-type reactors to new fuel cycles is currently underway. This transition is accompanied by an increase in initial enrichment and an increase in the depth of fuel burnout. In this case, the characteristics of the fuel assemblies assigned to transportation go beyond the limits of the values given in the regulatory document, which requires a full calculation justification for the safety of transportation of a batch of SFAS. This problem requires the development of a methodology for calculating the safety of transportation, taking into account, on the one hand, the main factors affecting the safety characteristics,

and on the other - implemented in the framework of fairly simple computational codes. The article presents the main provisions of simplified methods for assessing the nuclear and radiation safety of SFAS transportation, as well as the results of control calculations.

Keywords: burnout depth, calculation evaluation methodology, regulatory requirements, spent fuel assemblies, radiation safety, transportation, nuclear safety.

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorohodov Assessment of environmental safety of water transportation of goods, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 162—169.

Введение

Проблема утилизации отработавшего ядерного топлива в настоящее время характеризуется практически полной загрузкой свободного объёма временных хранилищ отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), в частности, на площадках АЭС, а также внедрением новых топливных циклов, в рамках которых обращаются ОТВС с повышенной остаточной активностью. В этой связи увеличивается время пребывания ОТВС в бассейнах выдержки [1] (для снижения активности до безопасного уровня) и актуализируются вопросы обеспечения безопасной транспортировки радиационно- и ядерноопасных грузов, к которым относятся ОТВС, с более напряженными характеристиками.

Транспортировка ОТВС осуществляется в специальных транспортно-упаковочных комплексах (ТУК), состоящих из защитного контейнера и чехла, в котором размещаются топливные сборки [2].

Степень безопасности транспортировки должна быть обоснована и подтверждена соблюдением нормативных требований [3].

Специфика подобной задачи сопряжена с решением непростых вопросов из области физики реакторов, прохождения излучения через вещество, а также вопросов теплопередачи и теплообмена. Объективными исходными данными задачи перевозки ОТВС являются: начальное обогащение ядерного топлива, длительность топливной кампании, схема перестановки ТВС (тепловыделяющих сборок) в пределах активной зоны ядерного реактора в ходе топливной кампании, время выдержки ОТВС в бассейне для снижения их наведённой активности и уменьшения остаточного тепловыделения и т.п. Однако для перехода к нормативным показателям, регламентирующим все возможные операции с ОТВС (в том числе и транспортировку), необходимо выполнить ряд трудоёмких, специфических расчётов, требующих специального вычислительного инструментария и профильных специалистов. Таким образом задача обоснования безопасности из области соблюдения общего регламента технологических операций переходит в область специфического подтверждения (расчётного и экспериментального) требований нормативной документации.

Оценка ядерной и радиационной безопасности всегда «геометрически» конкретна. Как было сказано, несколько ОТВС для перевозки размещаются в специальных загрузочных чехлах ТУК. Возможна ситуация, при которой в чехол помещаются безопасные (по отдельности) кассеты, совокупное действие которых не будет безопасным ни по ядерным характеристикам, ни по радиационным. Единственным априорным интегральным параметром, включающим в себя все возможные численные оценки безопасности

транспортируемого объекта (сборки ОТВС, извлечённой из активной зоны), является минимальное время выдержки топливной сборки в специальном приреакторном бассейне с борированной водой. За это время активность ОТВС, определяющая ядерную и радиационную безопасность, снижается до уровня, разрешающего транспортировку.

В настоящее время практика обоснования безопасности транспортировки ОТВС связана с использованием отраслевого стандарта ОСТ 95 745-2005 [4].

Специальные приложения ОСТ 95 745-2005 содержат табличные данные о минимальном времени выдержки ОТВС реакторов ВВЭР - 440 и ВВЭР - 1000 в приреакторном бассейне для последующей безопасной транспортировки. В таблицах приводятся: обозначение ТВС (номер ячейки по картограмме загрузки чехла отработавшими сборками), начальное обогащение топлива, глубина его выгорания в процессе кампании, модель (конструкция) ТУК, в котором размещаются ОТВС для транспортировки. В ячейках таблиц документа приводится минимальное время выдержки ОТВС в бассейне для снижения радиоактивности и остаточных тепловыделений до безопасных, при перевозке, значений. Прочерки в ячейках таблиц указывают на отсутствие данных для повышенной глубины выгорания топлива.

Анализ отраслевого стандарта позволяет выявить высокую степень консерватизма при принятии решений и большую неопределённость в организации транспортировки ОТВС с повышенной глубиной выгорания (свыше 50 Гвт-сут/тУ). Подобный вывод связан с широким полем диапазона значений, для которых решение, на основе стандарта, принимается исходя из максимальной глубины выгорания ТВС. Поэтому достаточное время выдержки ОТВС с меньшей глубиной выгорания из данного диапазона в действительности существенно меньше. В силу отсутствия информации в стандарте по ОТВС повышенной глубины выгорания, требуется проведение комплексных многоступенчатых расчётов конкретных загрузок чехлов с ОТВС для оценки нормируемых показателей безопасности.

Проблема расчёта ядерной и радиационной безопасности

Базовой характеристикой топливной сборки, извлечённой из активной зоны по окончании кампании, является удельное объёмное энерговыделение ОТВС, обусловленное нейтронным и гамма-излучением. Оценка нуклидного состава отработавшего топлива – задача сложная.

Состав нуклидов зависит от начального обогащения топлива, конструкции ТВС, режима работы реактора, картограммы перестановки ТВС в пределах активной зоны в ходе кампании. Другими словами, требуется проследить за меняющимися характеристиками

каждой ТВС на протяжении трёх и более лет. Поэтому, каждая ОТВС, как источник излучения – уникален. Такая задача может быть решена и решается с разной степенью приближения. Чем проще модель – тем консервативнее результаты расчётной оценки. В частности, анализ ядерной безопасности сборки ОТВС, размещённой в транспортном упаковочном комплекте может быть проведен, и часто проводится, в предположении «свежего топлива», хотя известно, что в процессе кампании топливо выгорает (уменьшается концентрация делящегося материала), а также накапливаются шлаки, поглощающие нейтроны и такое приближение достаточно консервативно. На практике это означает, что в транспортный контейнер или хранилище будет загружено ОТВС в количестве меньше допустимого.

Мы уже указывали на внедрение в практику эксплуатации АЭС с ВВЭР новых топливных циклов с целью увеличения глубины выгорания ядерного топлива. При этом задача достаточно точной оценки нуклидного состава отработавшего топлива приобретает повышенную значимость. Подобный расчёт состава проводится с привлечением множества параметров каждой извлекаемой ТВС в течение всей кампании при учёте пространственной неравномерности характеристик отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В указанном направлении существует несколько уровней приближения расчётной оценки нуклидного состава отработавшего топлива [5]: актиноиды, за исключением минорных; все актиноиды и, наконец, наиболее точное приближение - актиноиды и продукты деления. Подобные углублённые расчёты предполагают разработку методов и программных средств расчёта, а также проведение достаточного числа экспериментов для валидации методик.

В руководстве по безопасности [6] приводятся рекомендуемые к использованию радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива, а также ядерные константы. В частности, для номенклатуры тепловыделяющих сборок ВВЭР-1000 приводятся аппроксимирующие коэффициенты, введённые для расчёта концентрации отдельных нуклидов в зависимости от глубины выгорания отработавшего ядерного топлива на момент останова реактора. Диапазон применения расчётных зависимостей для оценки концентраций отдельных нуклидов ограничивается средним обогащением по ^{235}U из диапазона (3 - 4,95)% и проектной глубиной выгорания топлива - 50-70 ГВт·сут./тU.

Точная оценка нуклидного состава отработавшего топлива – самостоятельная и сложная задача, требующая значительных ресурсов для реализации. В любом случае при оценке ядерной безопасности ОТВС при транспортировке и хранении, определив нуклидный состав или ограничившись характеристиками «свежего топлива», необходимо, в соответствии с [7], провести расчёт критерия ядерной безопасности - эффективного коэффициента размножения нейтронов - $K_{эфф}$ для конкретной конфигурации ОТВС и убедиться в выполнении нормативных требований.

Характеристики ОЯТ, рассчитанные в рамках оценки ядерной безопасности сборки ОТВС, размещённой в пределах транспортно- упаковочного комплекта,

используются при анализе радиационной безопасности.

Обоснование радиационной безопасности - сложный и многоступенчатый процесс. К радиационным характеристикам ОЯТ относятся: активность (Бк), число нейтронов и (или) гамма-квантов, испускаемых в единицу времени (1/с), остаточное энерговыделение (Вт), радиотоксичность (Зв) (свойство радиоактивных изотопов вызывать патологические изменения при попадании их в организм).

В рамках анализа радиационной безопасности устанавливается зависимость между нормируемыми параметрами, в первую очередь эффективной дозой, и объективными исходными данными: выгоранием топлива, нуклидным составом ОЯТ, защитными характеристиками транспортного контейнера и т.п.

Как отмечалось, безопасность транспортировки ОТВС обусловлена выполнением требований, установленных в [4]. Ограниченность документа обсуждалась выше. С другой стороны, состояние ядерной отрасли и тенденции её развития требуют уточнения, представленных в ОСТ 95 745-2005 нормируемых параметров.

С этой целью, как правило, используются довольно сложные лицензионные программные продукты, требующие высокой квалификации пользователя и не всегда обеспечивающие оперативность получения результатов (например – ORIGEN [8] (оценка нуклидного состава ОЯТ), MCNP [9] (оценка дозы излучения за защитой) и т.п.).

Выполняется, также, расчёт остаточного тепловыделения ОТВС, для подтверждения не превышения температурой оболочек твэлов допустимых значений и проводится расчёт потери радиоактивного содержимого из ТУК.

Итак, повторим, обоснование безопасности транспортировки ОТВС – задача комплексная, многофакторная, трудоёмкая, которая решается в рамках строгих требований.

В предлагаемой статье представлен сравнительно простой алгоритм, уточняющий параметры отраслевого стандарта [4], в рамках методики, учитывающей объективные исходные данные, и обеспечивающей оценку необходимых нормируемых параметров, не прибегая к использованию сложных алгоритмов и систем.

Методика оценки ядерной безопасности

Для подтверждения ядерной безопасности транспортировки ОЯТ необходимо произвести расчеты $K_{эфф}$ в системе ТУК+ОТВС и сравнить полученные результаты с критериями безопасности, приведенными в НП-053-04 [7]. Причём, $K_{эфф}$ не должен превышать 0,95 в нормальных и аварийных ситуациях транспортировки. При выполнении данного требования, в упаковочном комплекте не возникает самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления (СЦР).

В предлагаемом алгоритме оценки ядерной безопасности используется ряд допущений.

Используется приближение «свежего топлива», что обеспечивает консервативную оценку ядерной безопасности, так как нуклидный состав топлива, назначенного к транспортировке, не учитывается.

Следует отметить, что критическими характеристиками транспортировки ОЯТ являются

параметры оценки радиационной безопасности. При подтверждении радиационной безопасности, ядерная безопасность обеспечивается. Поэтому приближение «свежее топливо», упрощает алгоритм оценки ядерной безопасности, не снижает степени достоверности итоговой оценки, при условии достаточно корректного проведения расчётного анализа радиационной безопасности.

Зона размещения ОТВС в загрузочном чехле представлена в виде топливных ячеек (блоков), размещённых в определенной геометрической последовательности, составляющей правильную решетку. Свойства размножающей среды как для всей зоны ОТВС, так и любой её части (например, ячейки решетки) одинаковы. Следовательно, можно проводить расчет для одной элементарной ячейки гетерогенной решетки.

С целью упрощения расчётов выполняется гомогенизация элементарной ячейки гетерогенной решетки, при этом реальная элементарная ячейка заменяется эквивалентной расчетной двузонной ячейкой, состоящей из топлива и гомогенной смеси конструкционных материалов и замедлителя [10].

Используется однопольное приближение, при котором нейтроны в ОТВС считаются моноэнергетическими, все ядерные константы усредняются по спектру Максвелла, а нейтронный поток в эквивалентной ячейке приравнивается среднему потоку нейтронов в ТУК.

Оценка ядерной безопасности транспортировки ОТВС выполняется в следующем порядке.

Определяются геометрические характеристики ОТВС, элементарной ячейки.

Вычисляются ядерные концентрации компонентов зоны загрузочного чехла ТУК и проводится расчет макроконстант компонентов эквивалентной ячейки.

Рассчитывается коэффициент размножения в бесконечной размножающей среде, с последующим вычислением эффективного коэффициента размножения - $K_{эфф}$, учитывающего конечные размеры ТУК.

Методика оценки радиационной безопасности

При транспортировке ОЯТ радиационная безопасность должна обеспечиваться таким образом, чтобы величины доз, индивидуальных и коллективных, а также вероятность облучения удерживались на разумно достижимом низком уровне и не превышали установленных в [11] пределов. В частности, в любой точке внешней части поверхности ТУК, максимальная мощность дозы излучения не должна превосходить 10 мЗв/ч.

Перечислим основные процессы, генерирующие ионизирующее излучение ОТВС: спонтанное деление ядер урана и актиноидов, нейтроны (α, n) – реакции на кислороде топлива и продуктах деления, фотонейтроны (α, n) – реакции на ядрах урана и актиноидов.

В предлагаемом алгоритме учитываются лишь доминирующие источники излучения, которые характеризуются наибольшей проникающей способностью: нейтроны (считается, что мгновенные нейтроны обладают одинаковой энергией); жёсткие гамма - кванты, сопровождающие деление и распад продуктов деления (энергетический спектр разбивается на несколько групп); жёсткие гамма - кванты, возникающие в материалах зоны ТУК и

корпуса контейнера (спектр разбивается на несколько групп). Указанные компоненты излучения – независимы, поэтому суммарная мощность дозы в расчетной точке складывается из трёх составляющих (принцип суперпозиции).

В основу методики расчета положены следующие предположения и допущения [12].

Источником нейтронного и гамма-излучения излучения быстрых нейтронов и гамма-квантов является зона размещения ОТВС в чехле ТУК. Считаем излучение источника – изотропным.

В общем случае мощность излучения нейтронов и гамма-квантов зависит от координат точки, в которой она определяется. Для целей расчёта радиационной защиты принимаем распределение мощности излучения в зоне ОТВС равномерным по объёму и постоянным во времени.

Заменяем реальный цилиндрический источник излучения линейным источником. Поглощение излучения из внутренних областей объёмного источника (ОТВС) учитываем при переходе к эквивалентному линейному источнику геометрическим фактором - «эффективной толщиной самопоглощения».

Ослабление плотности потока излучения в любой среде подчиняется экспоненциальному закону, который учитывает прямое нерассеянное излучение (эффект от рассеянного излучения за защитой, учитывается специальным множителем - фактором накопления - «В»).

Плотности потоков от трёх компонентов излучения вычисляются по следующим соотношениям.

Плотность потока захватного гамма-излучения из материалов ТУК.

$$\Phi_{\gamma,i}^{захв} = \frac{q_{V\gamma,i}^{захв} \cdot B_i}{2 \cdot \mu_{Fe,i}} \cdot [E_2(b_1) - E_2(b_1 + h \cdot \mu_{Fe,i})], \quad (1)$$

где $q_{V\gamma,i}^{захв}$ – удельная мощность захватного гамма-излучения, $\frac{\text{квант}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$; i – номер группы гамма-квантов, на которые делится спектр излучения; B_i – фактор накопления рассеянного гамма-излучения; $\mu_{Fe,i}$ – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения в стальных защитных слоях, см^{-1} ; $E_2(b_1)$ – интегральная экспонента второго порядка; h – суммарная толщина материалов внутри контейнера и корпуса, см; b_1 – относительная толщина защиты от гамма-излучения.

Плотности потока гамма-излучения.

$$\Phi_{\gamma,i}^{общ} = \frac{R_{сб}^2 \cdot q_{V\gamma,i}^{общ} \cdot B_i}{2 \cdot (a+Z)} \cdot F(\theta; b_2), \frac{\text{квант}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}; \quad (2)$$

где $q_{V\gamma,i}^{общ}$ – удельная мощность мгновенного и захватного гамма-излучения i - ой группы из области размещения ОТВС в чехлах контейнера, $\frac{\text{квант}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$; B_i – фактор накопления излучения; $R_{сб}$ – эквивалентный радиус сборки ОТВС, см; a – расстояние от поверхности сборки до внешней поверхности контейнера; Z – эффективная толщина самопоглощения, см; $F(\theta; b_2)$ – интегральная функция секанса.

Плотности потока излучения за защитой от быстрых нейтронов.

$$\Phi_{\text{бн}} = \frac{R_{сб}^2 \cdot q_{VH}}{2 \cdot (a+Z)} \cdot F(\theta; b_2), \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}; \quad (3)$$

где q_{VH} – удельная мощность нейтронного излучения из области размещения ОТВС в чехлах контейнера, $\frac{\text{нейтр}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$

Воспользовавшись справочными данными [13], о дозах, создающихся единичным флюенсом излучения определённого вида (нейтронное или гамма – излучение) находим интегральную дозу излучения в расчётной точке (точке детектирования). Последовательно определяя интегральную дозу в различных точках, воспроизводим поле дозовой нагрузки за пределами ТУК.

Оценка надежности и безопасности радиационной защиты осуществляется по значениям мощности доз, создаваемых излучением непосредственно за защитными слоями контейнера.

Расчёт радиационной защиты ТУК

Выполним проверку защитных свойств самых распространённых контейнеров для перевозки ОТВС ВВЭР-1000 с глубиной выгорания до 50 Гвт·сут/тU – ТУК 13/1В (рис.1), в случае транспортировки топлива повышенной активности (повышенной глубины выгорания).

Контейнер изготавливался в 1987-1991 г.г. Предназначен для перевозки отработавших ТВС серийных ВВЭР-1000. Вместимость упаковки – 12 ТВС [14].

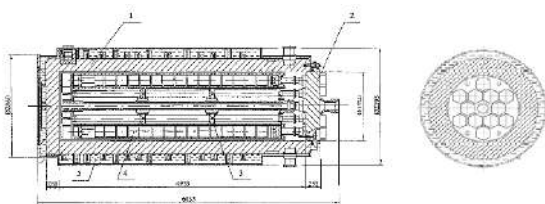


Рис. 1. Транспортно-упаковочный комплект - ТУК 13/1В

1-корпус контейнера; 2-крышка, 3- чехол, 4- тепловыделяющая сборка; 5-нейтронная защита

В ходе расчётной оценки оценим мощность дозы излучения в направлении стенки, дна и крышки ТУК. В расчётах учитываются особенности распространения излучения в радиальном и аксиальном направлениях.

После формирования грузочной комплектации ОТВС, проводятся расчеты активности источников излучения (продукты деления, актиноиды, продукты активации). Исходными данными выступают: начальное обогащение топлива, глубина выгорания, сведения о компании. Результатом оценки являются выход нейтронов и γ -квантов и их энергетические спектры.

Зная номенклатуру тепловыделяющих сборок (среднее начальное обогащение по $U^{235},\%$ и проектную глубину выгорания $\frac{\text{ГВт}\cdot\text{сут}}{\text{тU}}$), в соответствии

с документом [6] определяем активность актиноидов – источников нейтронного и гамма-излучения ОТВС и, далее, преобразуем активность в энергию (удельную мощность) источников нейтронного и гамма-излучения $q_{V\gamma,i}^{\text{захе}}$, $q_{V\gamma,i}^{\text{общ}}$ и q_{VH} . Затем формируем расчётную схему ТУК с учётом допущений, изложенных выше.

Результаты расчётной оценки интегральной мощности дозы на наружной поверхности защитного контейнера и в окружающем контейнер пространстве приведены в таблицах 1-3 и на рис. 2.

Таблица 1

Мощность дозы излучения на поверхности контейнера, Мзв/час

Направление излучения	Обогащение, % / Глубина выгорания, Гвт·сут/тU		
	3,9/50	4,3/56	4,67/68
Боковая поверхность	6,2	7,43	11,5
Днище	2,84	3,4	5,28
Крышка	8,79	10,6	16,3

Таблица 2

Мощность дозы излучения в направлении боковой поверхности, Мзв/час

Расстояние, м	Боковая поверхность		
	Обогащение, %		
	3,9	4,3	4,67
0,25	4,62	5,58	8,56
0,5	3,68	4,45	6,83
0,75	3,06	3,7	5,67
1	2,62	3,16	4,86

Таблица 3

Мощность дозы излучения в направлении крышки и дна ТУК, Мзв/час

Расстояние, м	Днище			Крышка		
	Обогащение, %			Обогащение, %		
	3,9	4,3	4,67	3,9	4,3	4,67
0,25	1,93	2,34	3,58	5,64	6,79	10,45
0,5	1,41	1,71	2,62	3,97	4,78	7,36
0,75	1,09	1,32	2,02	2,98	3,59	5,52
1	0,87	1,05	1,61	2,33	2,81	4,32

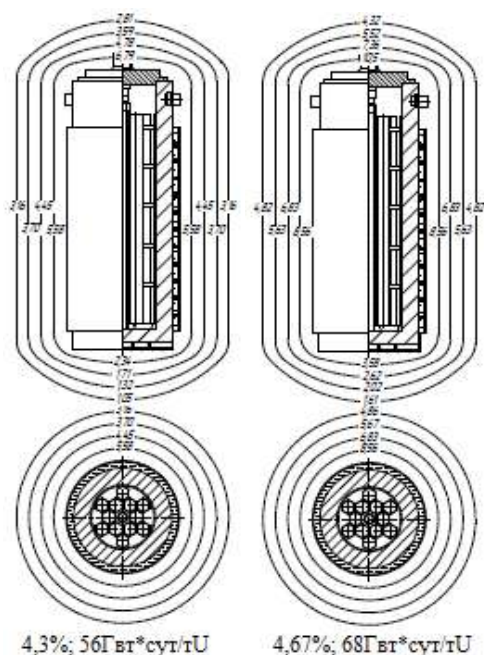


Рис. 2. Поле излучения ТУК 13/1В при загрузке ОТВС с различными характеристиками

Анализ данных табл. 2 показывает, что ТУК не обеспечивает радиационную защиту от излучения при условии размещения 12 ОТВС с глубиной выгорания 56 и $68 \frac{\text{ГВт}\cdot\text{сут}}{\text{тU}}$. При этом подтверждена безопасность транспортировки ОТВС с глубиной выгорания $50 \frac{\text{ГВт}\cdot\text{сут}}{\text{тU}}$.

В табл. 2,3 и на рис. 2 приведены характеристики поля ионизирующего излучения в аксиальном и радиальном направлении от наружной поверхности контейнера в пределах 1 метра.

Защитные характеристики ТУК13/1В, в случае размещения 12 ОТВС с повышенной глубиной выгорания, не отвечают требованиям радиационной безопасности. Максимальная мощность дозы фиксируется в направлении крышки контейнера.

Итак, транспортировка ОТВС с глубиной выгорания, превышающей 50 ГВт·сут/тU в ТУК 13/1В возможна при адекватном усилении защитных характеристик (изменении конструкции), что вряд ли целесообразно, или при уменьшении числа ОТВС, размещаемых в чехле контейнера.

Расчёты показали, что загрузка 10 ОТВС вместо 12 позволяет обеспечить требования радиационной безопасности при безусловном выполнении требований безопасности ядерной.

Заключение

При обосновании безопасности транспортировки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в транспортных упаковочных комплектах (ТУК) необходимо подтвердить соблюдение требований ядерной и радиационной безопасности, установленных в нормативных документах, а именно - уровней мощности дозы на поверхности и за пределами ТУК (радиационная безопасность), значений эффективного коэффициента размножения (ядерная безопасность) и т.д.

Всестороннее обоснование безопасности предполагает проведение комплекса

нетривиальных, трудоёмких расчётов из разных предметных областей физики - из области нейтронной физики, взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, теплопередачи. Опираясь на известные характеристики топлива, а именно - конструкцию тепловыделяющей сборки (ТВС), начальное обогащение топлива, глубину выгорания, время выдержки сборки в бассейне охлаждения и т.д., можно перейти к перечисленным выше нормируемым показателям: коэффициенту размножения, мощности дозы и т.д.

Подобные расчёты выполняются в рамках сложных вычислительных кодов (программ), применение которых требует высокой квалификации пользователей, предполагает высокопроизводительную вычислительную технику и, как правило, наличие лицензии на эксплуатацию программного продукта. Очевидно, что процедура принятия решения, в рамках описанной технологии расчётной оценки, занимает значительное время и не всегда доступна.

Отчасти указанную проблему решает действующий в настоящее время отраслевой стандарт ОСТ 95 745-2005. В нём для отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реакторов типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 консервативно установлены диапазоны известных характеристик топлива: начальное обогащение, глубина выгорания и т.д., при соответствии которым, требования нормативных документов обеспечиваются безусловно. При этом необходимость в проведении комплексных трудоёмких расчётов отпадает, и обоснование безопасности транспортировки ОТВС сводится к подтверждению выполнения требований отраслевого стандарта.

В то же время за консерватизм приходится расплачиваться снижением эффективности перевозки ОТВС (заниженные объёмы перевозимого отработавшего топлива), что является следствием не оправданно высоких запасов по безопасности, реализуемых в отраслевом стандарте.

Другим обстоятельством, требующим снижения степени консерватизма отраслевого документа, является переход ядерной энергетики с реакторами типа ВВЭР на новые топливные циклы, который сопровождается увеличением начального обогащения и глубиной выгорания топлива. В этом случае характеристики ОТВС, назначенных к транспортировке, превышают значения, приведённые в нормативном документе, что приводит к необходимости полного расчётного обоснования безопасности перевозки партии ОТВС. Данная проблема требует либо непрерывного уточнения отраслевого стандарта, что вряд ли оперативно возможно, либо разработки методологии расчётной оценки безопасности транспортировки ОТВС, учитывающей все основные факторы, влияющие на характеристики безопасности, которая может быть реализована в рамках достаточно простых вычислительных кодов, не отягощённых проблемами лицензионных программных комплексов.

В статье приведены основные положения методик оценки ядерной и радиационной безопасности транспортировки ОТВС, которые после соответствующей настройки, учитывающей особенности топливных характеристик ТВС,

геометрию упаковки кассет в ТУК, свойства защитных материалов, а также геометрические характеристики защитного контейнера могут оперативно

использоваться при обосновании безопасности транспортировки ОТВС.

Литература

1. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Волошин К.И. Безопасное хранение отработавшего ядерного топлива // В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020. Материалы Юбилейной Международной научно–практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 239-243.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Волошин К.И. Безопасность перевозки отработавшего ядерного топлива // В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021. Материалы Международной научно–практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 268-275.
3. НП–061–05. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергетики. ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2005.
4. ОСТ 95 745-2005. Отработавшие тепловыделяющие сборки ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР. Общие требования к поставке на заводы регенерации. Отраслевой стандарт. Росатом. М., 2005.
5. J.C. Neuber, AREVA NP GmbH Germany, J.M. Conde Lopez, Consejo de Seguridad Nuclear. Spain, Lecture 3, Overview, Workshop on Criticality Safety/Burnup Credit (BUC) in Spent Fuel. Handling and Storage, State Office for Nuclear Safety, Prague, 19-23 March 2007.
6. РБ–093–20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных. ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2020. 99с.
7. НП–053–16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2017. 111с.
8. Gauld I.C., Bowman S.M., Horwedel J.E. ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing For Spent Fuel Depletion, Decay and Source Term Analysis: ORNL/TM-2005/39, version 6, Vol. I, Sect D1. - Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
9. X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 5, April 2003.
10. Каминский В.Ю. Нейтронно-физический расчёт ВВЭР: уч. пос.- СПб.: ПИМаш, 2012. - 116 с
11. СанПиН 2.6.1.1281–03. Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ). Минздрав России. М., 2003.
12. Каминский В.Ю. Расчёт биологической защиты ядерного реактора. - СПб.: ПИМаш, 2010. - 72 с.
13. Машкович В.П., Кудрявцев А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 494 с.
14. Козлов Ю.В., Сафутин В.Д., Тихонов Н.С., Токаренко А.И., Спичев В.В. Длительное хранение и транспортирование отработавшего ядерного топлива // Атомная энергия. 2000. Т.89 - Вып. 4. С.273-284.

References

1. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A., Voloshin K.I. Safe storage of spent nuclear fuel // In the collection: Transport of Russia: problems and prospects – 2020. Materials of the Jubilee International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg, 2020. pp. 239-243.
2. Kaminsky V.Yu., Skorokhodov D.A., Voloshin K.I. Safety of spent nuclear fuel transportation // In the collection: Transport of Russia: problems and prospects – 2021. Materials of the International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2021. pp. 268-275.
3. NP–061–05. Safety rules for the storage and transportation of nuclear fuel at nuclear power facilities. FS on Environmental, Technological and Nuclear Supervision. M., 2005.
4. OST 95 745-2005. Spent fuel assemblies of nuclear power reactors of the VVER type. General requirements for delivery to regeneration plants. Industry standard. Rosatom. M., 2005.
5. J.C. Neuber, AREVA NP GmbH Germany, J.M. Conde Lopez, Consejo de Seguridad Nuclear. Spain, Lecture 3, Overview, Workshop on Criticality Safety/Burnup Credit (BUC) in Spent Fuel. Handling and Storage, State Office for Nuclear Safety, Prague, 19-23 March 2007.
6. RB-093-20. Safety Guidelines for the use of Atomic Energy. Radiation and thermophysical characteristics of spent nuclear fuel of water-water power reactors and high-power channel reactors. FS on Environmental, Technological and Nuclear Supervision. M., 2020. 99 p.
7. NP-053-16. Safety rules for the transportation of radioactive materials. FS on Environmental, Technological and Nuclear Supervision. M., 2017. 111 p.
8. Gauld I.C., Bowman S.M., Horwedel J.E. ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing For Spent Fuel Depletion, Decay and Source Term Analysis: ORNL/TM-2005/39, version 6, Vol. I, Sect D1. - Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
9. X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 5, April 2003.
10. Kaminsky V.Yu. Neutron physics calculation of VVER: Uch. pos. SPb. PIMASH, 2012. 116 p.
11. SanPiN 2.6.1.1281–03. Sanitary rules on radiation safety of personnel and the public during the transportation of radioactive materials (substances). Ministry of Health of Russia. M., 2003.
12. Kaminsky V.Yu. Calculation of biological protection of a nuclear reactor. SPb. PIMASH, 2010. 72 p.
13. Mashkovich V.P., Kudryavtsev A.V. Protection from ionizing radiation: Handbook. – 4th ed., reprint. and additional. M. Energoatomizdat, 1995. 494 p.

14. Kozlov Yu.V., Safutin V.D., Tikhonov N.S., Tokarenko A.I., Spichev V.V. Long-term storage and transportation of spent nuclear fuel // Atomic Energy. 2000. Vol.89 - Issue 4. pp. 273-284.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, PhD, Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 004.8, 004.9

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.039>

Исследование временных рядов метеорологических наблюдений как признаков для прогноза скорости ветра в нейронной сети

Д.Н. Кобзаренко¹ kobzarenko_dm@mail.ru, А.М. Камилова¹ anna702@mail.ru

¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН

Аннотация. В работе приведены результаты эксперимента по оценке степени влияния временных рядов метеорологических наблюдений на точность прогноза скорости ветра в нейронной сети. Результаты позволяют сделать выводы о метеорологических параметрах, которые могут быть использованы в более качественном решении задачи прогноза скорости ветра, а также об оптимальном временном интервале – размере блока данных для примера X на входе нейронной сети.

В качестве исходных данных сгенерированы временные ряды метеорологических параметров на основе наблюдений от четырех метеорологических станций Республики Дагестан (Ахты, Дербент, Кочубей и Махачкала) за период 2011-2020гг с частотой измерений 8 раз в сутки.

При исследовании временных рядов метеорологических наблюдений как признаков для прогноза скорости ветра в нейронной сети решены следующие задачи: разработка архитектуры нейронной сети для проведения эксперимента; разработка и реализация алгоритмов проведения эксперимента; визуализация и анализ результатов эксперимента.

В результате выполнения эксперимента определены группы метеорологических параметров, которые в большей/меньшей степени влияют на точность прогноза скорости ветра в нейронной сети; показано, что прогнозы по станциям синхронно разнятся по всем параметрам для четырех рассмотренных метеостанций; показано, что оптимальный размер блока данных при котором средние точности прогноза достигают максимальных значений, имеет размер 12 суток.

Ключевые слова: Скорость ветра, анализ данных, искусственный интеллект, нейронная сеть, глубокое машинное обучение.

Для цитирования: Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М. Исследование временных рядов метеорологических наблюдений как признаков для прогноза скорости ветра в нейронной сети, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 170—176.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.039>

Research time series of meteorological observations as features for wind speed forecasting in a neural network

Dmitry N. Kobzarenko¹ kobzarenko_dm@mail.ru, Ayshat M. Kamilova¹ anna702@mail.ru

¹Institute for Geothermal and Renewable Energy Research – Branch of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of an experiment to assess the degree of influence of time series of meteorological observations on the accuracy of the forecast of wind speed in a neural network. The results allow us to draw conclusions about meteorological parameters that can be used in a better solution of the problem of predicting wind speed, as well as about the optimal time interval – the size of the data block for example X at the input of a neural network.

As initial data, time series of meteorological parameters were generated based on observations from four meteorological stations of the Republic Dagestan (Akhty, Derbent, Kochubey and Makhachkala) for the period 2011-2020 with a measurement frequency of 8 times a day.

When studying time series of meteorological observations as signs for predicting wind speed in a neural network, the following tasks were solved: development of a neural network architecture for conducting an experiment; development and implementation of algorithms for conducting an experiment; visualization and analysis of experimental results.

As a result of the experiment, groups of meteorological parameters were determined, which to a greater or lesser extent affect the accuracy of the forecast of wind speed in the neural network; it is shown that forecasts for stations synchronously differ in all parameters for the four considered weather stations; it is shown that the optimal size of the data block at which the average accuracy of the forecast reaches the maximum values has a size of 12 days.

Key words: Wind speed, data analysis, artificial intelligence, neural network, deep machine learning.

For citation: Dmitry N. Kobzarenko, Ayshat M. Kamilova, Research time series of meteorological observations as features for wind speed forecasting in a neural network. 2022. № 4 part 1, P. 170—176.

Введение

Модели нейронных сетей и алгоритмы глубокого машинного обучения прочно закрепились в качестве

одного из инструментов современных научных исследований в различных областях науки и техники.

В исследовании ресурсов возобновляемых источников энергии нейронные сети также успешно

применяются в последнее десятилетие, что отражено, как в отечественных [1,2], так и в зарубежных [3-5] научных публикациях.

Алгоритмы глубокого машинного обучения можно применять не только при постановке классических задач искусственного интеллекта, таких как регрессия или классификация, но и для проверки исследовательских гипотез, взаимосвязей в наборах данных и временных рядах.

В работе поставлена задача вычислительного эксперимента по изучению степени влияния различных метеорологических параметров на точность прогноза скорости ветра в модели нейронной сети. Для этого используется подготовленный датасет на базе метеорологических наблюдений от четырех метеорологических станций в Республике Дагестан. Датасет содержит данные метеорологических наблюдений (15 параметров) за временной период 2011-2020 гг. по станциям Ахты, Дербент, Кочубей и Махачкала с частотой измерения 8 раз в сутки.

Работа является продолжением научных исследований целью которых является разработка оптимальных и эффективных моделей для краткосрочного прогнозирования скорости и направления ветра в Дагестане. Данные исследования, как и разработанные модели могут стать основой для создания интеллектуальных комплексных установок возобновляемых источников энергии, которые будут использовать краткосрочный прогноз скорости и направлении ветра для принятия управляющих решений.

Ранее были разработаны и проанализированы модели нейронных сетей для задачи классификации метеорологической станции на основе временных рядов скоростей и направлений ветра [6]. Было установлено для каких станций нейронная сеть лучше идентифицирует временные ряды и какой оптимальный размер временной выборки для входного примера X.

Далее, в работе [7] было установлено, что добавление одномерных сверточных слоев [8-10] в нейронной сети дает существенный эффект в точность прогноза. Также была разработана архитектура нейронной сети с одномерными сверточными слоями и тремя параллельными ветками, которая дает более сбалансированный по станциям результат прогноза.

Результаты работ [6, 7] легли в основу текущего эксперимента.

1. Архитектура нейронной сети

В качестве технического обеспечения реализации эксперимента используются: язык программирования Python, среда удаленной разработки с предоставлением графического ускорителя для ускорения процесса обучения нейронной сети – Google Colaboratory и библиотека для реализации моделей нейронных сетей Keras.

Поскольку, с точки зрения освоения ветровой энергетики не представляется очень важным точное (до 1 м/с) прогнозирование скорости ветра, задачу можно упростить до прогнозирования градаций скорости ветра, разделенных на небольшое число

классов. Для этого нами определены 4 класса градаций скорости ветра и задача прогнозирования скорости ветра сведена к задаче классификации.

Определения классов следующие:

Класс 0 – скорость ветра в интервале 0-2 м/с;

Класс 1 – скорость ветра в интервале 3-4 м/с;

Класс 2 – скорость ветра в интервале 5-8 м/с;

Класс 3 – скорость ветра 9 и выше м/с.

Важным в эксперименте является понятие **размера блока данных**, которое также приводится в работах [6, 7]. Это размер вектора входных примеров нейронной сети – вырезка последовательности n измерений из временного ряда, которая предшествует прогнозируемому временному отсчету. Размер блока данных определяется в сутках, например, если он равен 3 суткам, то вектор входного примера содержит вырезку из $3 \cdot 8 = 24$ измерений. В [6] показано, что размер блока данных влияет на точность прогноза, как бы предоставляя возможность нейронной сети взглянуть на входные данные с разным охватом.

На основе опыта предыдущих исследований и предварительного тестирования подобрана относительно несложная архитектура нейронной сети, представленная на рис. 1. Она не является окончательным вариантом модели для прогнозирования скорости ветра, может быть дополнена и усовершенствована, но достаточна для того, чтобы решить задачу текущего исследования. Так как экспериментов достаточно много, то усложнять архитектуру сети на данном этапе исследований не имеет смысла – расчеты трудоемки, чем сложнее архитектура, тем большие вычислительные мощности требуются для ее обучения.

Спроектированная архитектура нейронной сети (рис. 1) имеет 8 нейронов на входе (их количество меняется в зависимости от размера блока входных данных X). Модель имеет один каскад одномерных слоев. Каскад состоит из слоя случайного отключения нейронов SpatialDropout1D, одномерного сверточного слоя Conv1D и слоя MaxPooling1D, который уменьшает размерность два раза через признаки максимумов. Далее идут два каскада на базе традиционных полносвязных слоев Dense с добавлением слоев нормализации батча BatchNormalization и случайного отключения нейронов Dropout.

Использование сверточных слоев в модели нейронной сети было бы не возможным без двух функции трансформации данных – reshape (для перевода одномерного вектора [n] в формат [n,1]) и flatten – (для выпрямления двумерного массива в вектор). Reshape вызывается до использования одномерного сверточного каскада, flatten – после.

На всех промежуточных слоях в качестве функции активации используется линейный выпрямитель – ReLu.

На выходе модели 4 нейрона, которые соответствуют 4 классам скорости ветра. Здесь используется функция активации softmax, что соответствует задаче классификации.

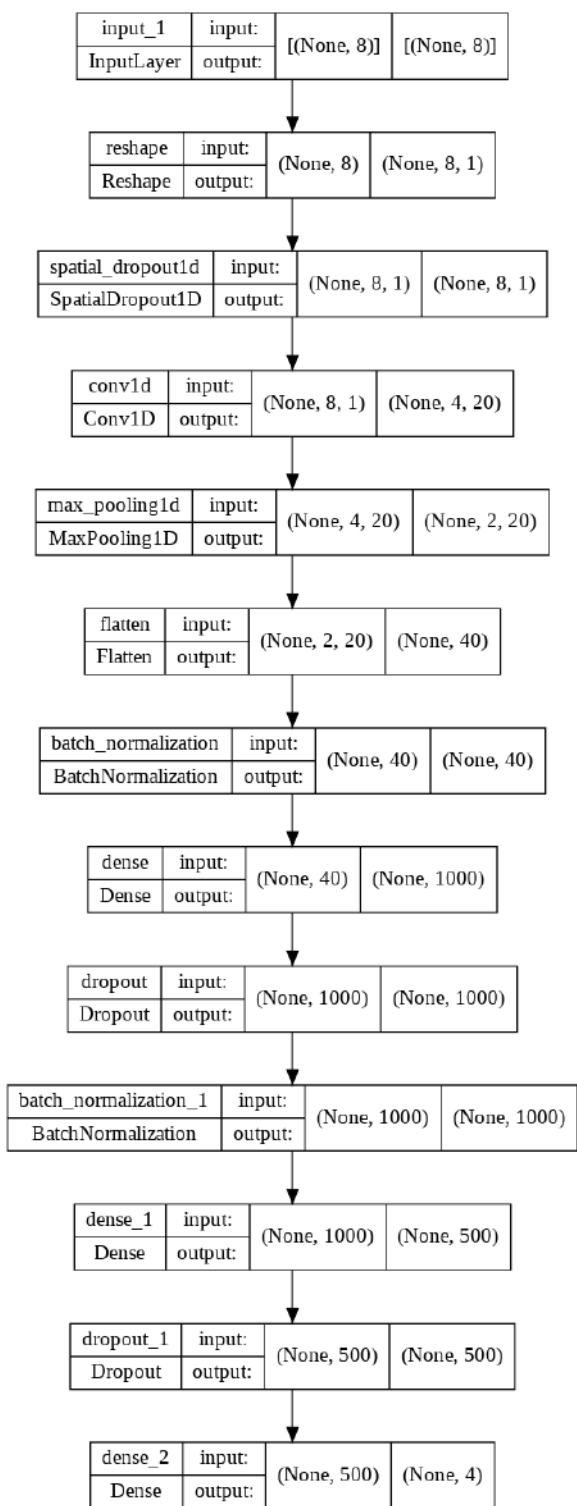


Рис. 1. Архитектура модели нейронной сети на объектах библиотеки Keras (скриншот из ноутбука Google Colaboratory)

2. Постановка эксперимента

В табл. 1 приведены метеорологические параметры, представленные в исходном датасете, которые участвуют в проведении эксперимента. Наряду с названием параметра в правой колонке приводится его условное обозначение.

Таблица 1

Метеорологические параметры			
№№	Название параметра	Единица измерения	Условное обозначение на графике
1	Температура воздуха	°C	t_air
2	Температура поверхности почвы	°C	t_soil
3	Температура точки росы	°C	t_dew
4	Порционное давление водяного пара	гПа	p_pws
5	Относительная влажность	%	rel_hum
6	Дефицит насыщения	гПа	sat_def
7	Атмосферное давление на уровне станции	гПа	p_atm
8	Барический градиент (вид кривой)	-	bar_m
9	Барический градиента, значение	гПа	bar_v
10	Видимость (шифр)	-	visib
11	Погода (шифр) W	-	W
12	Погода (шифр) ww	-	ww
13	Осадки	мм	prec
14	Направление ветра	градус угла	wind_d
15	Скорость ветра	м/с	wind_s

Алгоритм эксперимента состоит в переборе следующих параметров:

- для каждой станции: Ахты, Дербент, Кочубей, Махачкала;
- для каждого метеорологического параметра (все 15 параметров);
- для размеров блоков данных от 1 до 14 с шагом 1.

Таким образом, всего должно быть создано и обучено $4 * 15 * 14 = 840$ моделей, а все полученные точности обучения сохранены в структуру данных типа словарь, удобную для последующего анализа.

Как видно из приведенного алгоритма для каждой модели необходимо взять один метеорологический параметр для одной станции и выполнить нарезку примеров в зависимости от размера блока данных. При этом получаемое количество примеров для обучения и тестирования обратно пропорционально размеру блока данных.

Учитывая тот факт нейронная сеть лучше работает при числовых значениях в диапазоне $[0...1]$, на выходе функции, которая нарезает примеры X и Y, для примеров X используется нормировщик MinMaxScaler библиотеки sklearn, переводящий все значения в этот диапазон. Что касается примеров Y, то здесь номер класса переводится в формат единичного кодирования:

- класс 0 – вектор $[1, 0, 0, 0]$;
- класс 1 – вектор $[0, 1, 0, 0]$;
- класс 2 – вектор $[0, 0, 1, 0]$;

класс 3 – вектор [0, 0, 0, 1].

Нейронная сеть обучается со следующими глобальными параметрами, которые подобраны опытным путем:

- размер пакета при обучении (batch_size) = 200;
- процент отключения нейронов для Dropout = 10%;
- оптимизатор Adam;
- шаг обучения = 0.0001;
- количество эпох обучения = 100;
- функция потерь categorical cross entropy;
- метрика ассурасу.

Важным при обучении нейронной сети является решить проблему разбалансировки классов в обучающих примерах, поскольку количество примеров для разных классов существенно отличается. Для решения этой проблемы перед обучением сети рассчитываются веса классов для каждой метеорологической станции. Вес класса рассчитывается как частное от 1 на количество примеров класса. При обучении информация о весах классов передается через аргумент class_weight в методе fit.

Объем данных для выполнения эксперимента достаточно приличный, поэтому режим графического ускорителя обязательно должен быть подключен. Но даже в режиме графического ускорителя нет возможности провести все расчеты за один раз или два раза. Поэтому в программном коде предусматривается возможность фиксации промежуточных данных и точки остановки эксперимента, чтобы затем его продолжить.

3. Анализ результатов эксперимента

После завершения расчетов на основе результирующего словаря построены диаграммы, интерпретирующие результаты эксперимента.

Первая диаграмма (рис. 2) представляет собой распределение средней точности прогноза (точность усредняется для всех размеров блоков данных в диапазоне 1-14 суток) по метеорологическим параметрам и станциям.

На представленной диаграмме (рис. 2) можно наблюдать факт того, что нейронная сеть лучше всего прогнозирует скорость ветра на основе именно скорости ветра, кроме того, выделяются параметры, которые также играют большую роль в точности прогноза, например, атмосферное давление, относительная влажность и дефицит насыщения. В меньшей степени точность прогноза зависит от таких параметров, как осадки и погодные условия W/ww.

Диаграмма на рис. 2 также показывает то, что прогнозы по станциям синхронно разнятся по всем параметрам – лучше всего прогнозируются данные по станции Ахты, хуже всего – по станции Кочубей. И этой проблеме нужно уделить внимание при разработке окончательных моделей прогнозирования скорости ветра.

Исходя из того, что для разного размера блока данных точность прогноза получается разной, построена следующая диаграмма (рис. 3), которая

позволяет оценить абсолютную величину разности в точности прогноза скорости ветра для каждой станции и метеорологического параметра.

Диаграмма на рис.3 показывает, что минимальная разность в точности прогноза наблюдается для всех станций в параметре – скорость ветра. У других параметров разность ведет себя в разную, но у станции Дербент разности явно самые большие. Это означает, что размер блока данных играет большую роль при прогнозе скорости ветра в районе станции Дербент.

Далее рассмотрим, как распределяется точность прогноза скорости ветра в зависимости от размера блока данных. Для этого для каждого блока данных усредним значения по всем станциям и параметрам. Результаты сведем в диаграмму, показанную на рис. 4.

Диаграмма на рис. 4 показывает, что наблюдается рост средней точности прогноза с увеличением размера блока данных. Рост останавливается на значении размера блока данных в 12 суток. Именно эту величину и стоит рассматривать в качестве базового параметра для разработки моделей прогноза скорости ветра. Точно такой же размер блока данных в 12 суток был определен как оптимальный в задаче классификации, опубликованной в [6].

Заключение и выводы

Основные результаты работы сводятся к следующему:

- установлены группы метеорологических параметров, которые в большей/меньшей степени влияют на точность прогноза скорости ветра;
- установлено, что точность прогноза скорости ветра в максимальной степени зависит собственно от данных временного ряда – скорости ветра;
- установлено, что прогнозы по станциям синхронно разнятся по всем параметрам для четырех рассмотренных метеостанций;
- установлено, что минимальные разности в точностях прогнозов (по разным значениям размера блока данных) наблюдаются по всем станциям для параметра скорость ветра;
- установлено, что для станции Дербент разности максимальных/минимальных точностей прогнозов при варьировании размера блока данных сильно отличаются в большую сторону, что требует учесть при разработке финальных моделей прогноза скорости ветра для этого региона;
- установлен оптимальный размер блока данных в 12 суток при котором средние точности прогнозов достигают максимальных значений.

Полученные результаты представляют собой ценный материал для выполнения заключительного шага – разработки высокоточных моделей нейронных сетей для прогнозирования скорости ветра в Республике Дагестан.

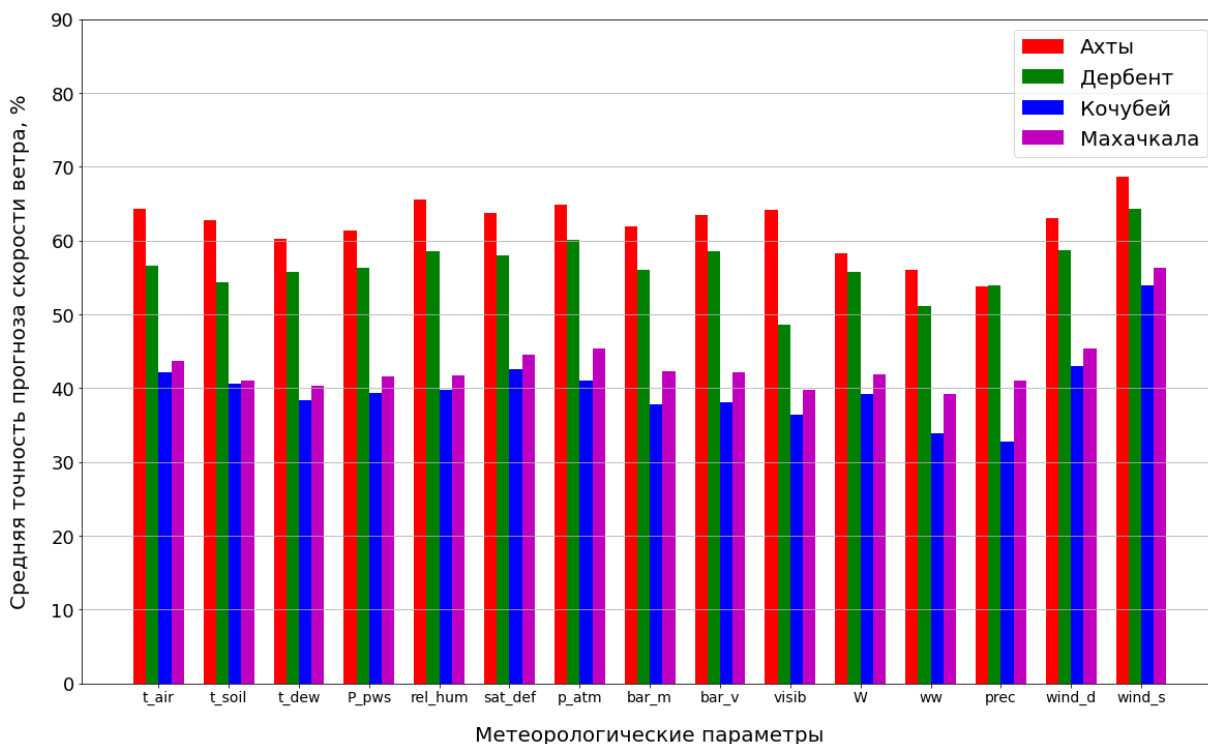


Рис. 2. Диаграмма распределения средней точности прогноза скорости ветра в нейронной сети по метеорологическим параметрам и станциям

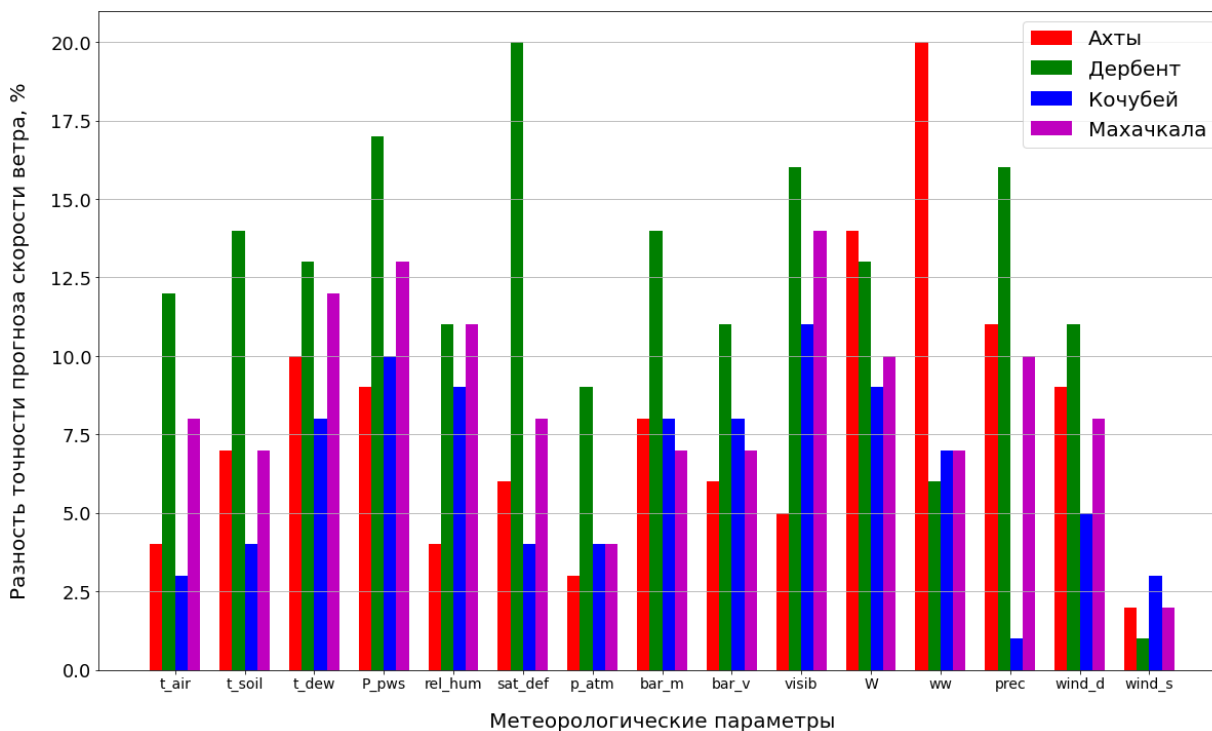


Рис. 3. Диаграмма распределения разности (между минимумом и максимумом при разных размерах блока данных) точностей прогноза скорости ветра в модели нейронной сети по метеорологическим параметрам и станциям

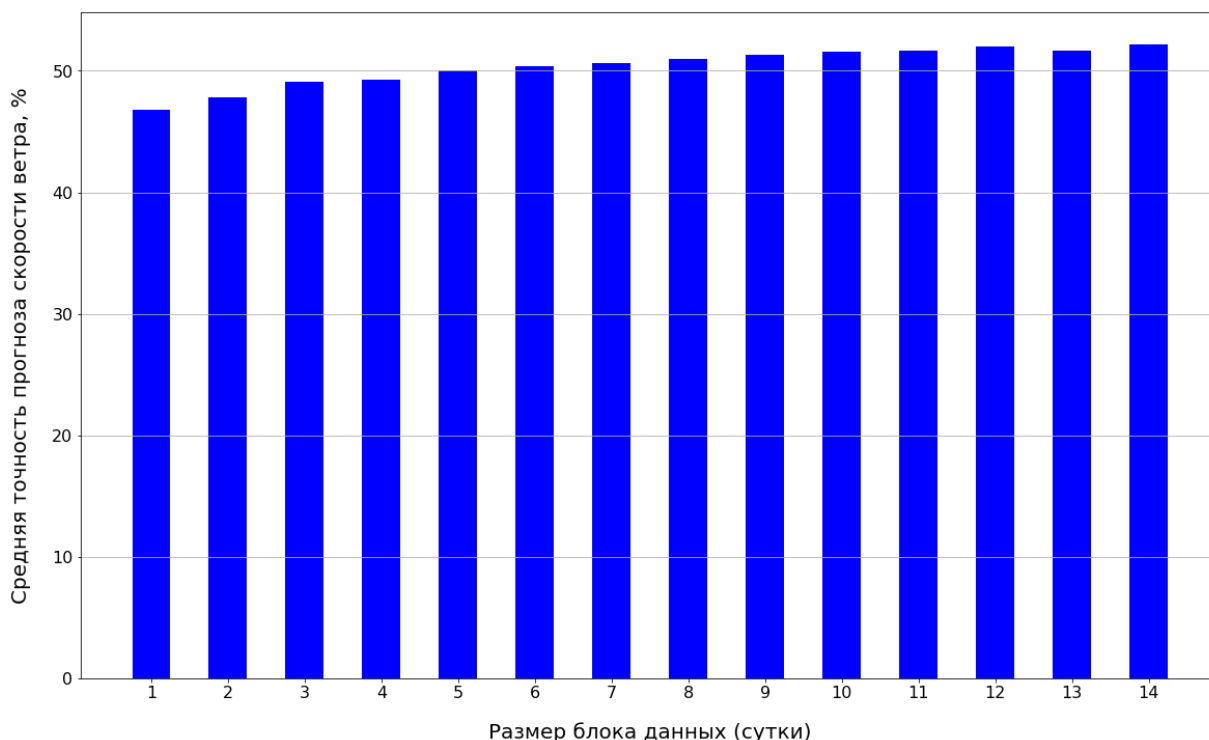


Рис. 4. Диаграмма распределения средней по всем метеорологическим параметрам и станциям точности прогноза в зависимости от размера блока данных

Литература

1. Матренин П.В., Манусов В.З., Игумнова Е.А. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3 (47). С. 69-80.
2. Мустафаев А.Г. Нейросетевая модель прогнозирования уровня солнечной энергии для задач альтернативной энергетики // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 2. С. 150-157.
3. Catalão J.P.S., Pousinho H.M.I., Mendes V.M.F. Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, Renewable Energy, no. 36, pp. 1245-1251, 2011.
4. Senthil Kumar P, Daphne Lopez, Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks, International Journal of Renewable Energy Research, vol. 6, no. 3, pp. 833–837, 2016.
5. Boubacar Doucoure, Kodjo Agbossou, Alben Cardenas Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data, Renewable Energy, no. 92, pp. 202-211, 2016.
6. Кобзаренко Д.Н. Анализ временных рядов – скоростей и направлений ветра с помощью моделей нейронных сетей и задачи классификации // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 4 (54). С. 127-133.
7. Кобзаренко Д.Н., Мустафаев А.Г., Шихсаидов Б.И. Эффективность использования одномерных сверточных слоев в нейронной сети на примере классификации метеорологической станции по данным временных рядов – скоростей ветра // Информационные технологии. 2022. Т. 28, № 9. С. 497-504.
8. Yu, J., Zhang C., Wang S. Multichannel one-dimensional convolutional neural network-based feature learning for fault diagnosis of industrial processes // Neural Comput & Applic, 2021. Vol. 33. P. 3085–3104.
9. Sujanaa J., Palanivel S., Balasubramanian M. Emotion recognition using support vector machine and one-dimensional convolutional neural network // Multimed Tools Appl, 2021. Vol. 80. P. 27171–27185.
10. Sharma S., Sen S. One-dimensional convolutional neural network-based damage detection in structural joints // J Civil Struct Health Monit, 2020, Vol. 10, P. 1057–1072.

References

1. Matrenin P.V., Manusov V.Z., Igumnova E.A. Ustojchivoe kratkosrochnoe prognozirovanie skorosti vetra s pomoshch'yu adaptivnyh kompaktnyh nejronnyh setej [Sustainable short-term wind speed prediction using adaptive compact neural networks]. Problemy regional'noj energetiki, 2020, No 3 (47), S. 69-80.
2. Mustafaev A.G. Nejrosetevaya model' prognozirovaniya urovnya solnechnoj energii dlya zadach al'ternativnoj energetiki [Neural network model for forecasting solar energy level for alternative energy problems]. Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody, 2016, No 2, S. 150-157.
3. Catalão J.P.S., Pousinho H.M.I., Mendes V.M.F. Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, Renewable Energy, no. 36, pp. 1245-1251, 2011.
4. Senthil Kumar P, Daphne Lopez, Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks, International Journal of Renewable Energy Research, vol. 6, no. 3, pp. 833–837, 2016.

5. Boubacar Doucoure, Kodjo Agbossou, Alben Cardenas Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data, *Renewable Energy*, no. 92, pp. 202-211, 2016.
6. Kobzarenko D.N. Analiz vremennyh ryadov – skorostej i napravlenij vetra s pomoshch'yu modelej nejronnyh setej i zadachi klassifikacii [Analysis of time series – wind speeds and wind directions using neural network models and classification task] *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021. T.1. No 4 (54). S. 127-133.
7. Kobzarenko D.N., Mustafaev A.G., Shihsaidov B.I. Effektivnost' ispol'zovaniya odnomernyh svertochnyh sloev v nejronnoj seti na primere klassifikacii meteorologicheskoy stancii po dannym vremennyh ryadov – skorostej vetra [Efficiency of using one-dimensional convolutional layers in a neural network on the example of classification a meteorological station according to wind speeds time series data] *Informacionnye tekhnologii*, 2022, T.28, No 9. S. 497-504.
8. Yu, J., Zhang C., Wang S. Multichannel one-dimensional convolutional neural network-based feature learning for fault diagnosis of industrial processes // *Neural Comput & Applic*, 2021. Vol. 33. P. 3085–3104.
9. Sujanaa J., Palanivel S., Balasubramanian M. Emotion recognition using support vector machine and one-dimensional convolutional neural network // *Multimed Tools Appl*, 2021. Vol. 80. P. 27171–27185.
10. Sharma S., Sen S. One-dimensional convolutional neural network-based damage detection in structural joints // *J Civil Struct Health Monit*, 2020, Vol. 10, P. 1057–1072.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Николаевич Кобзаренко, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории комплексного освоения возобновляемых энергоресурсов, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН, 367030, Махачкала, пр-т Имама Шамиля, 39а, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Dmitry N. Kobzarenko, Dr. Sci. (Eng), Leading Researcher, Institute for Geothermal and Renewable Energy Research – Branch of Joined Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Imama Shamilya, 39a, Makhachkala, 367030, Russian Federation, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Айшат Магомедрасуловна Камилова, ведущий инженер-программист общего отдела, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН, 367030, Махачкала, пр-т Имама Шамиля, 39а, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Ayshat M. Kamilova, Leading software engineer of the general department, Institute for Geothermal and Renewable Energy Research – Branch of Joined Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Imama Shamilya, 39a, Makhachkala, 367030, Russian Federation, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.11.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

Научная статья

УДК 004.932.2: 004. 93' 1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.040>

Классификация и структурированное описание образов проблемной среды в модели представления знаний автономных интеллектуальных мобильных систем

Мелехин В.Б.¹ pashka1602@rambler.ru, Хачумов М.В.^{2,3} khmike@inbox.ru

¹Дагестанский государственный технический университет, ²Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН, ³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН

Аннотация. В статье рассмотрена классификация образов и характеризующих их признаков, опираясь на которую построено два вида структурированного описания различных объектов и живых существ (субъектов), которые могут находиться в проблемной среде и использоваться автономной интеллектуальной мобильной системой в соответствии с ее функциональным назначением. Первый вид предложенного структурированного описания типовых элементов представления знаний автономных интеллектуальных мобильных систем определяется деревом, позволяющим организовать индуктивный вывод в процессе идентификации отдельных объектов и субъектов проблемной среды и на этой основе установить класс, род, вид и индивидуум, к которым они относятся. Второй вид структурированного эталонного описания индивидуумов представляет собой помеченный гиперграф, сложные вершины которого определяются структурными элементами объектов и субъектов проблемной среды, а также характерными для них признаками и количественными оценками, позволяющими интеллектуальной системе организовать на их основе выбор результативных действий в процессе планирования целенаправленной деятельности в априори неописанных условиях функционирования. Сочетание обеих типовых структур модели представления знаний обеспечивает автономным интеллектуальным мобильным системам возможность организации дедуктивного вывода и позволяет на этой основе обобщить и пополнить знания об отдельных объектах и субъектах, находящихся в проблемной среде. Это в свою очередь дает возможность расширить класс решаемых интеллектуальными системами задач в процессе планирования целенаправленной деятельности в априори неописанных проблемных средах.

Предложен принцип построения импликативных решающих правил, позволяющих автономным интеллектуальным мобильным системам организовать принятие приближенных решений и на этой основе осуществить вывод правдоподобных умозаключений, связанных с идентификацией различных объектов и субъектов, наблюдаемых в априори неописанных условиях проблемной среды.

Определена основная проблема дальнейшего развития предложенного способа структурированного описания объектов и субъектов проблемной среды в модели представления знаний автономных интеллектуальных мобильных систем, которая связана с необходимостью разработки эффективных инструментальных средств автоматического построения гиперграфов, характеризующих структуру и признаки индивидуумов, находящихся в текущих условиях функционирования.

Ключевые слова: автономная интеллектуальная мобильная система, проблемная среда, структурированное описание образов, модель представления знаний, вывод решений, планирование целенаправленной деятельности.

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. Классификация образов проблемной среды и их структурированное описание в модели представления знаний автономных интеллектуальных систем. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 177—184.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.040>

Classification and structured description of objects of the problematic environment in the knowledge representation model of autonomous intelligent mobile systems

Vladimir B. Melekhin¹ pashka1602@rambler.ru, Mikhail V. Khachumov^{2,3} khmike@inbox.ru

¹Dagestan State Technical University, Russian Federation, ²Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ³Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Abstract. The article considers the classification problem of patterns and features that characterize them, based on which two types of structured descriptions of various objects and living beings (subjects) of a problematic environment are built, which can be used by an autonomous intelligent mobile system in accordance with its functional purpose. The first type of the proposed structured description of the typical elements of knowledge representation of autonomous intelligent mobile systems is determined by a tree that allows organizing inductive inference in the process of identifying

individual objects and subjects of the problematic environment and, on this basis, establishing the class, genus, species, and individuals to which they belong. The second type of a structured reference description of individuals is a labeled hypergraph, the complex vertices of which are determined by the structural elements of objects and subjects of the problematic environment, as well as their characteristic features and quantitative estimates, which allow the intelligent system to organize on their basis the choice of effective actions in the process of planning a goal-seeking activity in a priori undescribed operating conditions. The combination of both typical structures of the knowledge representation model provides autonomous intelligent mobile systems with the ability to organize deductive inference and, on its basis, generalize and replenish their knowledge about individual objects and subjects in a problematic environment. This, in turn, makes it possible to expand the class of tasks solved by intelligent systems in the process of planning goal-directed activities in a priori undescribed problematic environments.

The principle of constructing implicative decision rules is proposed, which allow autonomous intelligent mobile systems to organize the adoption of approximate decisions and, on this basis, to draw plausible conclusions related to the identification of various objects and subjects observed in a priori undescribed conditions of the problematic environment.

The main problem of further development of the proposed method for the structured description of objects and subjects of the problematic environment in the knowledge representation model of autonomous intelligent mobile systems is determined, which is associated with the need to develop effective tools for automatically constructing hypergraphs characterizing the structure and features of individuals in the current operating conditions.

Keywords: autonomous intelligent mobile system, problematic environment, structured description of objects, knowledge representation model, derivation of solutions, planning of goal-directed activity.

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: Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov. Classification and Structured Description of Objects of the Problematic Environment in the Knowledge Representation Model of Autonomous Intelligent Mobile Systems, Marine intellectual technologies, 2022. № 4 part 1, P. 177—184.

Введение

Распознавание образов проблемной среды (ПС) является одной из ключевых проблем организации результативной целенаправленной деятельности автономных интеллектуальных мобильных систем (АИМС) различного назначения в условиях неопределенности. В общем случае под АИМС следует понимать, например, автономных мобильных роботов, автономных дронов-манипуляторов, способных выполнять различные задания после посадки на землю, автономно действующих подводных аппаратов, оснащенных манипулятором и т.п. [1]. Другими словами, различные АИМС представляют собой специализированные интеллектуальные системы, способные, согласно их назначению, активно взаимодействуя с ПС, целенаправленно действовать в определенном виде труднодоступных и агрессивных для человека средах.

Следует отметить, что основным модулем автоматической системы планирования целенаправленного поведения АИМС является интеллектуальный решатель задач, в структуру которого входит долговременная память, предназначенная для хранения модели представления знаний, определяющей структурированное описание закономерностей ПС и находящихся в ней объектов и субъектов. Именно модель структурированного описания различных объектов и субъектов, а также обобщающих их понятий, является основным источником знаний АИМС, служащих для распознавания образов ПС в процессе планирования целенаправленной деятельности в условиях неопределенности. При этом, с одной стороны, классификация и структурированное описание образов ПС позволяет упорядочить данные, хранящиеся в модели представления знаний, и на этой основе обеспечить их оперативный поиск и выборку в процессе вывода решений. С другой же стороны, такой подход к

организации и хранению знаний обеспечивает АИМС возможность целенаправленно выявлять по заданным признакам результативные действия над различными объектами ПС в процессе преобразования ее текущей ситуации в заданную целевую ситуацию и т.п.

Однако, структурированное описание закономерностей даже для априори известных проблемных сред, в которых предстоит действовать АИМС, не говоря уже о средах с неизвестным составом находящихся в ней объектов и отношений между ними, необходимое для решения АИМС различных задач, на практике не представляется возможным [2]. В этой связи возникает необходимость в структурированном описании, предполагаемых на основе функционального назначения АИМС, объектов и субъектов в виде эталонных моделей образов, которые позволяют их распознавать и обобщать для пополнения знаний на основе соответствующих им понятий в процессе планирования целенаправленной деятельности в априори неописанной ПС.

В настоящей статье предлагается один из подходов к решению данной проблемы путем классификации различных образов ПС и построения структурированного эталонного их описания в модели представления знаний АИМС.

1. Классификация образов проблемной среды

Определив родовидовые отношения на заданном множестве объектов и субъектов ПС

$$O = \{o_i(X_i)\}, i = \overline{1, n_1}$$

с учетом соответствующих и обобщающих их понятий, уточним следующим образом классификацию образов проблемной среды, приведенную в [3], где X_i – множество признаков,

однозначно определяющих i_1 образ проблемной среды, обеспечивающих АИМС возможность его идентификации.

В этом случае к первичным элементам модели представления знаний АИМС следует отнести индивидуумы, образующие подмножество

$O_1 \subset O, O_1 = \{o_{i_2}(X_{i_2})\}, i_1 = \overline{1, n_2}$ предполагаемых в соответствии с функциональным назначением интеллектуальных систем объектов и субъектов ПС, а также соответствующих им понятий τ_{i_2} , где X_{i_2} – множество признаков, однозначно определяющих $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ индивидуум проблемной среды.

Подмножество индивидуумов $O_2^{i_3} \subset O_1$, по характерному только для их элементов пересечению множеств характеристик X_{i_2} , образуют соответствующий им “вид” объектов или субъектов

ПС $o_{i_3}(X_{i_3}) \in O_3, O_3 = \{o_{i_3}(X_{i_3})\}, i_3 = \overline{1, n_3}$, определяющийся биективно соответствующим ему понятием τ_{i_3} , где X_{i_3} – множество характерных признаков, которыми должны обладать индивидуумы ПС относящихся к i_3 виду; n_3 – общее количество известных АИМС видов. Иначе говоря, индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ относится к $o_{i_3}(X_{i_3}) \in O_3$ виду и определяется соответствующим ему понятием τ_{i_3} , если выполняется условие $X_{i_3} \subset X_{i_2}$.

В свою очередь, подмножество $O_4^{i_4}$ различных видов $o_{i_3}(X_{i_3})$ по характерному только для его элементов пересечению множеств характеристик X_{i_3} образует соответствующий “род”

$o_{i_4}(X_{i_4}) \in O_4, O_4 = \{o_{i_4}(X_{i_4})\}, i_4 = \overline{1, n_4}$ объектов или субъектов ПС, который определяется понятием τ_{i_4} , где X_{i_4} – множество характерных признаков, которыми должны обладать индивидуумы $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ и их виды $o_{i_3}(X_{i_3}) \in O_3$, относящиеся к i_4 роду. Таким образом, индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ относится к $o_{i_4}(X_{i_4}) \in O_4$ роду и определяется соответствующим ему понятием τ_{i_4} при выполнении условия $X_{i_4} \subset X_{i_3}$.

Наконец, различные подмножества $O_4^{i_4}$, определяемые понятием “род” объектов или субъектов ПС $o_{i_4}(X_{i_4}) \in O_4$ по характерному только для их элементов $o_{i_4}(X_{i_4})$ пересечению множеств характеристик X_{i_4} , образуют соответствующий им “класс”

$o_{i_5}(X_{i_5}) \in O_5, O_5 = \{o_{i_5}(X_{i_5})\}, i_5 = \overline{1, n_5}$, который определяется понятием τ_5 . Здесь X_{i_5} – множество характеристик, которыми должны обладать

индивидуумы $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$, а также их подмножества, определяемые соответствующими им понятиями τ_{i_3} “вид” $o_{i_3}(X_{i_3})$ и τ_{i_4} “род” $o_{i_4}(X_{i_4})$.

Следовательно, индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ относится к $o_{i_5}(X_{i_5}) \in O_5$ классу объектов, когда справедливо следующее условие $X_{i_5} \subset X_{i_2}$.

Необходимо отметить, что объединение отдельных индивидуумов ПС понятиями “вид”, “род” и “класс” позволяет расширить о них знания АИМС, например, с учетом особенностей их коллективной деятельности в различных условиях проблемной среды и на этой основе организовать более эффективную целенаправленную деятельность интеллектуальных систем. Например, большая стая саранчи может нанести существенный вред сельскохозяйственным угодьям и требует вывода решений, определяющих действия, направленные на ее уничтожение и т.п.

Таким образом, предложенная классификация образов ПС позволяет АИМС в зависимости от характера решаемой в текущий момент времени задачи как обобщать предметные и субъектные знания, так и конкретизировать их в процессе вывода решений.

Важную роль в распознавании различных образов ПС $o_{i_1}(X_{i_1}) \in O$ играют их структурные

(составные) части $F_{i_2} = \{f_{i_2}^{k_1}\}, k_1 = \overline{1, n_6}$, а также

отношения $R = \{r_{k_2}\}, k_2 = \overline{1, n_7}$ между ними, определяющие характер их соединения и возможного взаимодействия между собой. Например, переднее крыло автономного беспилотного летательного аппарата самолетного типа является частью, которая крепится к его фюзеляжу на расстоянии l_{k_3} от носа, а также обеспечивает летательному аппарату необходимую подъемную силу и т.п. При этом множество F_{i_2} составных частей различных индивидуумов ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ разбивается на следующие подмножества:

– основные структурные части $F_{i_2}^1 \subset F_{i_2}, F_{i_2}^1 = \{f_{i_2}^{k_3}\}, k_3 = \overline{1, n_8}$, к которым крепятся остальные части индивидуумов ПС;

– составные части основных частей $F_{i_2}^2 \subset F, F_{i_2}^2 = \{f_{i_2}^{k_4}\}, k_4 = \overline{1, n_9}$;

– неделимые структурные части индивидуумов и их основных частей

$F_{i_2}^3 \subset F, F_{i_2}^3 = \{f_{i_2}^{k_5}\}, k_5 = \overline{1, n_{10}}$.

Следовательно, использование отношений “часть – целое” и элементов множеств $F_{i_2}^1, F_{i_2}^2, F_{i_2}^3$ и R позволяет построить и описать адекватным образом структуру соответствующего им индивидуума ПС $o_{i_2}(X_{i_2})$.

В свою очередь, множество признаков $P = \{p_{j_1}\}, j_1 = \overline{1, m_1}$, характеризующих образы ПС и их структурные части, разбивается на следующие классы.

1. Подмножество признаков

$P_1 \subset P, P_1 = \{p_{j_2}\}, j_2 = \overline{1, m_2}$, определяющих умения и действия, которыми, соответственно, обладают и могут отработать определенные объекты и субъекты ПС. Например, птицы летают и т.п.

2. Класс признаков

$P_2 \subset P, P_2 = \{p_{j_3}\}, j_3 = \overline{1, m_3}$, характеризующих геометрическую форму образов ПС. Например, индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ имеет форму шара и т.п.

3. Подмножество признаков

$P_3 \subset P, P_3 = \{p_{j_4}\}, j_4 = \overline{1, m_4}$, описывающих назначение образов ПС, например, в качестве какого инструмента и для чего АИМС может использовать индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ в процессе своей целенаправленной деятельности.

4. Класс признаков

$P_4 \subset P, P_4 = \{p_{j_5}\}, j_5 = \overline{1, m_5}$, характеризующих цвет образов ПС и их составных частей.

5. Подмножество признаков

$P_5 \subset P, P_5 = \{p_{j_6}\}, j_6 = \overline{1, m_6}$, определяющих материалы из которых состоят образы ПС и их составные части.

При построении модели представления знаний АИМС целесообразно также учитывать количественные оценки $y_{i_2}^{*j_6}$ различных

параметров $y_{i_2}^{j_7} \in Y, Y = \{y_{i_2}^{j_7}\}, j_7 = \overline{1, m_{i_2}}$, характеризующих индивидуумы $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ ПС и их составные части $f_{i_2}^{k_1} \in F_{i_2}$, например, вес, габаритные размеры структурных частей и т.д., где m_{i_2} – общее число параметров, которые позволяют

адекватно оценить все необходимые для вывода решений АИМС количественные характеристики i_2 индивидуума и его составных частей.

Следует отметить, что количественные оценки $y_{i_2}^{*j_7}$ параметров $y_{i_2}^{j_7} \in Y$, характеризующих различные индивидуумы ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$, в модели представления знаний АИМС целесообразно представить обобщенным образом, используя определенные интервальные количественные значения, найденные, например, исходя из технических характеристик интеллектуальной системы (например, грузоподъемности и размеров захвата рабочего органа манипулятора). Это позволяет АИМС определять результативные

действия над определенными индивидуумами ПС в процессе планирования целенаправленной деятельности. Например, если интеллектуальная система в процессе вывода решений устанавливает, что индивидуум среды $o_{i_2}(X_{i_2})$ имеет вес и габаритные размеры одной из своих составных частей, соответственно, не более 3 кг и 5 см, то этот объект можно быть захвачен рабочим органом манипулятора АИМС и оторван от земли.

Для обобщенного описания различных параметров индивидуумов ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ в модели представления знаний АИМС удобно использовать следующие тройки:

$$\langle f_{i_2}^{**k_1}; T_{k_1}^{j_8}, j_8 = \overline{1, 5}; \mu(f_{i_2}^{*k_1}) \rangle,$$

где $f_{i_2}^{**k_1}$ – идентификатор параметра $f_{i_2}^{k_1}; T_{k_1}^{j_8}$

– терм одноименной с параметром $f_{i_2}^{k_1}$ лингвистической переменной [4], в интервал численных значений $(y_{j_8}^* - y_{j_8+1}^*)$ которого попадает количественная оценка $f_{i_2}^{*k_1}$ параметра индивидуума $o_{i_2}(X_{i_2})$ ПС; $\mu(f_{i_2}^{*k_1})$ – степень принадлежности количественной оценки $f_{i_2}^{*k_1}$ параметра $f_{i_2}^{k_1}$ к нечеткому множеству, соответствующему j_8 терму лингвистической переменной; $y_{j_8}^*, y_{j_8+1}^*$ – соответственно верхняя и нижняя граничные оценки подинтервала численных значений терма $T_{k_1}^{j_8}$ на интервале количественных значений лингвистической переменной. Необходимо также отметить, что степень принадлежности $\mu(f_{i_2}^{*k_1})$ количественных оценок в описании параметров характеризующих индивидуумы ПС, служит для определения степени нечеткого равенства

$$\rho(\mu(f_{i_2}^{*k_1}), \mu(f_{i_2}^{*k_2})) = \mu(f_{i_2}^{*k_1}) \leftrightarrow \mu(f_{i_2}^{*k_2})$$

сравниваемых между собой двух значений $f_{i_2}^{*k_1}$ и $f_{i_2}^{*k_2}$ параметра $f_{i_2}^{k_1}$, попадающих в подинтервал количественных оценок одного и того же терма $T_{k_1}^{j_8}$, где \leftrightarrow – операция нечеткой эквивалентности [5].

В общем же случае, для структурированного описания различных индивидуумов ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ и обобщающих их понятий в модели представления знаний АИМС, на основе предложенной выше классификации образов ПС и их признаков, целесообразно использовать специальные графы и гиперграфы с различным уровнем общности пометок вершин и ребер.

2. Структурированное описание образов ПС в модели представления знаний АИМС

Рассмотрим модель представления знаний, позволяющую АИМС идентифицировать объекты и субъекты ПС на основе индуктивного вывода решений (от общего к частному). Пусть

произвольные индивидуумы ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O_1$ в процессе вывода решений АИМС определяются множеством соответствующих им признаков X_{i_2} . В этом случае эталонное описание различного вида образов ПС, относящихся к определенному классу в модели представления знаний АИМС, обеспечивающее возможность идентификации различных индивидуумов ПС путем вывода от общего к частному, целесообразно представить в виде следующего дерева принятия решений (рис. 1). Таким образом, для идентификации наблюдаемого в ПС индивидуума $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, в модуле технического зрения АИМС на основе поступающей из ПС информации, требуется сформировать множество характеризующих его признаков X_{i_2} . Затем подать на вход модуля распознавания образов АИМС данное множество, и на первом шаге идентификации путем проверки

условий $X_{i_5} \subset X_{i_2}, i_5 = \overline{1, n_5}$ установить класс, к которому относится индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2})$. Затем осуществляется проверка условий $X_{i_4}^{j_7} \subset X_{i_2}, j_7 = \overline{1, m_8}$ и $X_{i_4}^{j_8} \subset X_{i_2}, j_8 = \overline{1, m_9}$, по результатам которой, соответственно, определяется род и вид, к которому относится данный индивидуум. После этого, на последнем шаге идентификации, согласно выражению $\min_{j_9=1}^{m_{10}} |X_{i_2} \cap X_{i_2}^{j_9}|$, рассматриваемый индивидуум ПС $o_{i_2}(X_{i_2})$ конкретизируется и идентифицируется как известный АИМС образ ПС, обладающий множеством характеристик $X_{i_2}^{j_9}$, где $|X_{i_2} \cap X_{i_2}^{j_9}|$ – мощность множества $X_{i_2} \cap X_{i_2}^{j_9}$.

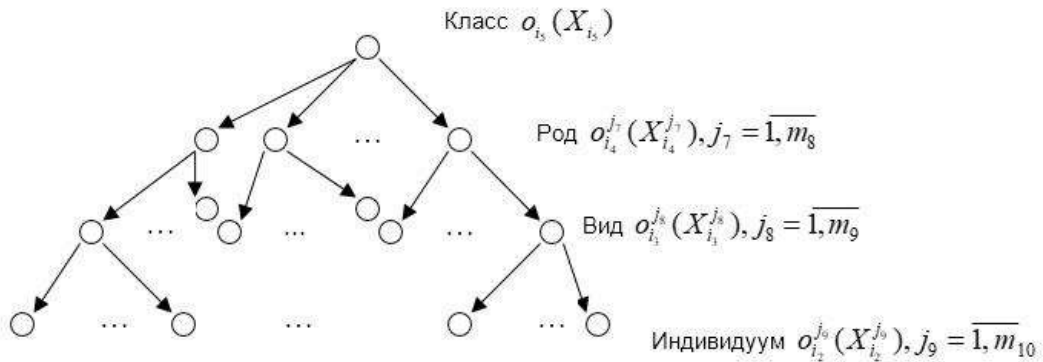


Рис. 1 – Структура модели идентификации индивидуумов ПС путем вывода решений от общего к частному

В случае, когда в модели представления знаний АИМС не найден класс, к которому относится находящийся в ПС объект или субъект, то для его первичной идентификации используется следующая

модель эталонного структурированного описания известных интеллектуальной системе образов проблемной среды (рис. 2).

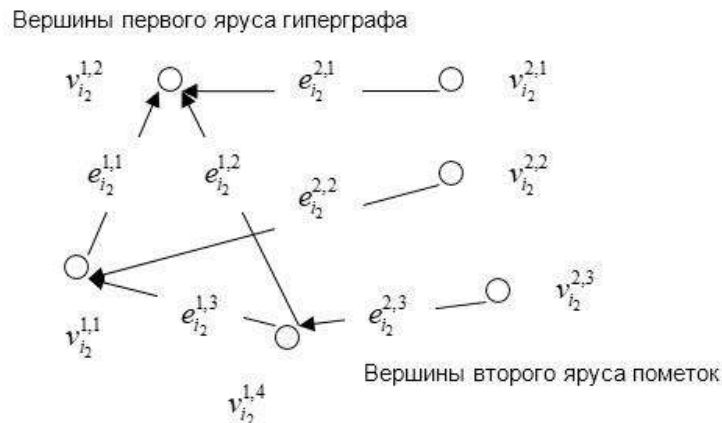


Рис. 2 – Двухъярусный гиперграф формального описания i_2 индивидуума ПС

Приведенная на рисунке 2 модель в сочетании с моделью, показанной на рисунке 1, позволяет организовать дедуктивный вывод решений в процессе идентификации объектов и субъектов ПС, т.е. от частного к общему. С этой целью структурированное эталонное описание известных

АИМС образов ПС $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$, показанное на рисунке 2, в модели представления знаний определяется следующими парами $\langle \tau_{i_2}, G_{i_2}^* \rangle$. Здесь τ_{i_2} – понятие, которому соответствует $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образ

проблемной среды; $G_{i_2}^* = (V_{i_2}^*, E_{i_2}^*)$ – гиперграф, вершины которого в эталонной модели помечены структурными элементами индивидуума $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ и соответствующими ему признаками, а ребра – семантическими отношениями [6], которые выполняются между структурными элементами в его формальном описании.

Вершины первого яруса $v_{i_2}^{1,j_{10}} \in V_{i_2}^*, j_{10} = \overline{1,3}$ в гиперграфе $G_{i_2}^*$, приведенном на рисунке 2, определяются семантическими деревьями $G_{i_2}^{j_{10}}, j_{10} = \overline{1, m_{11}}$, описывающими структуру $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образа ПС, где m_{11} – общее количество основных структурных частей, из которых состоит $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образ проблемной среды. Корневая вершина каждого такого дерева $G_{i_2}^{j_{10}}$ определяется соответствующей этому дереву основной структурной частью $f_{i_2}^{k_3} \in F_{i_1}^1$ описываемого $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образа проблемной среды. Вершины второго яруса в деревьях $G_{i_2}^{j_{10}}$ помечаются составными частями $f_{i_2}^{k_4} \in F_{i_1}^2$ соответствующих им основных структурных частей $f_{i_2}^{k_3} \in F_{i_1}^1$, а третий ярус вершин обозначается неделимыми частями $f_{i_2}^{k_4} \in F_{i_1}^3$ искомого образа ПС. В свою очередь, пометки ребер $e_{i_2}^{1,j_{11}} \in E_{i_2}^*, j_{11} = \overline{1,3}$ первого яруса гиперграфа $G_{i_2}^*$ осуществляются видом соединений между собой основных структурных частей эталонной модели $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образа ПС.

Вершины второго яруса $v_{i_2}^{2,j_{12}} \in V_{i_2}^*, j_{12} = \overline{1,3}$ гиперграфа $G_{i_2}^*$ в структурном плане представляют собой различные множества изолированных вершин $\{v_{i_2}^{j_{13}}\}, j_{13} = \overline{1, m_{j_{12}}}$. Каждая вершина во множестве $\{v_{i_2}^{j_{13}}\}$ помечается либо отдельным признаком, характеризующим соответствующую составную часть $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ образа ПС, либо параметром и его оценкой, определяющей одну из количественных характеристик этой составной части или ее признака. Что же касается сложных ребер $e_{i_2}^{2,j_{14}} \in E_{i_2}^*, j_{14} = \overline{1,3}$ инцидентных вершинам

первого и второго яруса в гиперграфе $G_{i_2}^*$, то их отдельные элементы определяются отношениями «имеет признак» или «имеет параметр» и связывают структурные части образа ПС $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ с характеризующими их признаками и параметрами, которыми помечены инцидентные им вершины из соответствующего множества вершин $\{v_{i_2}^{j_{12}}\}$.

Таким образом, предложенное на рисунке 2 структурированное эталонное описание отдельных образов ПС $o_{i_2}^*(X_{i_2}^*)$ в модели представления знаний АИМС позволяет идентифицировать определенные индивидуумы ПС $o_{i_2}(X_{i_2})$ при условии, что, соответственно описывающие их гиперграфы $G_{i_2}^*$ и G_{i_2} являются изоморфными между собой с учетом равенства пометок структурно эквивалентных в них вершин и ребер. Здесь $G_{i_2}^*$ – гиперграф, определяющий структурированное описание рассматриваемого АИМС $o_{i_2}(X_{i_2})$ индивидуума ПС, который имеет такую же структуру и содержание пометок вершин и ребер, что и гиперграф $G_{i_2}^*$. Данный гиперграф строится в интеллектуальном решателе задач на основе необходимых для этого инструментальных средств, позволяющих выделить структурные части в наблюдаемых в ПС объектах и субъектах и определить соответствующие им признаки на основе поступающей из ПС информации и знаний хранящихся в памяти АИМС.

Следует отметить, что разработка когнитивных инструментов автоматического синтеза гиперграфов $G_{i_2} = (V_{i_2}, E_{i_2})$, представляющих структурированное описание наблюдаемых АИМС в ПС объектов и субъектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, является самостоятельной проблемой распознавания образов и в настоящей работе не рассматривается. Кроме того, ряд достаточно эффективных подходов решения этой проблемы можно найти в различных источниках литературы по распознаванию образов, например, [7-11].

Для принятия приближенных решений в процессе идентификации АИМС различных объектов и субъектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ в условиях неопределенности, целесообразно использовать решающие правила, позволяющие организовать вывод правдоподобных умозаключений, связанных с идентификацией находящихся в ПС индивидуумов. Такие правила вывода правдоподобных умозаключений могут иметь, например, следующее содержание:

“Если структура, а также пометки структурно эквивалентных вершин и ребер в сравниваемых между собой гиперграфов G_{i_2} и $G_{i_2}^$ совпадают, например, на 95%, то принимается приближенное решение о том, что находящийся в ПС индивидуум ПС $o_{i_2}(X_{i_2})$ с высоким уровнем достоверности определяется*

понятием τ_{i_2} соответствующим эталонному описанию образа $o_{i_2}^(X_{i_2}^*)$, в модели представления знаний АИМС”.*

В результате правдоподобной идентификации наблюдаемого в ПС индивидуума $o_{i_2}(X_{i_2})$, на основе типовых элементов модели представления знаний, приведенных на рисунке 1, АИМС может установить вид, род и класс к которым он относится и на этой основе обобщить и пополнить свои знания об этом индивидууме. Такая возможность пополнения знаний обусловлена тем, что, идентифицировав находящиеся в ПС индивидуумы, и определив обобщающие их понятия, АИМС при необходимости может получить доступ к сведениям, характеризующим, например, возможности и результаты совместной деятельности как одноименных объектов и субъектов ПС, так и их коллективов, включающих индивидуумы, относящиеся к различным понятиям «род».

Для обеспечения возможности пополнения знаний, каждое понятие $\tau_{i_1}, \tau_{i_3}, \tau_{i_4}$ и τ_{i_5} , соответственно, определяющее индивидуум $o_{i_2}(X_{i_2})$, а также вид $o_{i_3}(X_{i_3})$, род $o_{i_4}(X_{i_4})$ и класс $o_{i_5}(X_{i_5})$ к которым он относится, дополнительно доопределяется ссылками $z_{i_2}, z_{i_3}, z_{i_4}$ и z_{i_5} , и в модели представления знаний АИМС хранится в следующем формате описания $\tau_{i_1}(z_{i_2}), \tau_{i_3}(z_{i_3}), \tau_{i_4}(z_{i_4})$ и $\tau_{i_5}(z_{i_5})$. Переход по данным ссылкам обеспечивает АИМС доступ к дополнительным сведениям, хранящимся в модели представления знаний, об индивидуумах ПС, которые не требуются для их идентификации, но являются необходимыми для вывода эффективных решений в процессе планирования целенаправленной деятельности в определенных условиях ПС.

Заключение

1. Предложенная классификация образов ПС позволяет упорядочить сведения о различных

индивидуумах проблемной среды, а также выполнить их структурированное эталонное описание в модели представления знаний и на этой основе обеспечить АИМС возможность идентифицировать находящиеся в проблемной среде объекты и субъекты в процессе планирования целенаправленной деятельности в априори неопределенных условиях функционирования.

2. Предложенная на рисунке 1 модель представления знаний позволяет АИМС осуществить индуктивный вывод в процессе принятия решений и на этой основе построить инструментальные средства распознавания отдельных объектов и субъектов ПС, обеспечив, таким образом, результативное манипулирование ими в процессе целенаправленной деятельности.

3. Структурированное описание априори предполагаемых в соответствии с функциональным назначением АИМС отдельных индивидуумов в модели представления знаний, позволяет интеллектуальным системам различного назначения организовать дедуктивный вывод и на этой основе обобщить и пополнить знания о наблюдаемых в ПС объектах и субъектах, определив особенности их коллективного поведения и взаимодействия между собой. Это, в свою очередь, расширяет АИМС возможности планирования результативной деятельности в различных априори непредсказуемых, спонтанно изменяющихся условиях функционирования.

4. Дальнейшее развитие предложенного подхода к описанию индивидуумов ПС в модели представления знаний автономных мобильных интеллектуальных систем, заключается в разработке инструментальных средств, позволяющих в интеллектуальном решателе задач АИМС строить, опираясь на поступающую из проблемной среды информацию, структурированную модель наблюдаемых в ней объектов и субъектов в виде гиперграфов, позволяющих выполнить их идентификацию.

Литература

1. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности: под ред. проф. В.М. Хачумова. СПб.: ПОЛИТЕХНИКА, 2022. 276 с.
2. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
3. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системы // Морские интеллектуальные технологии, 2022. Т. 1. № 3 (55). С. 181–187.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 168 с.
5. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. - М.: Наука, 1990. - 272 с.
6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. 4 изд, стереотип. М.: URSS, 2021. 288 с.
7. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
8. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1070 с.
10. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision. USA, California: Cole Publishing Company, 1999. 770 p.
11. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. London: Pearson, 2018. 1168 p.

References

1. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planirovanie povedeniya avtonomnykh intellektual'nykh mobil'nykh sistem v usloviyakh neopredelennosti [Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty]: pod red. prof. V.M. Khachumova, SPb., izd. «Politekhnik», 2022, 276 s.
2. Kalyaev A.V., Chernuhin YU.V., Noskov V.N., Kalyaev I.A. Odnородные upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots], M., izd. «Nauka», 1990, 147 s.
3. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Princip raspoznavaniya ob"ektov problemnoy sredy v processe planirovaniya povedeniya avtonomnoy intellektual'noy mobil'noy sistemy [The principle of recognizing objects in a problematic environment in the process of planning the behavior of an autonomous intelligent mobile system] Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], V. 1, N 3 (55), pp. 181–187, 2022.
4. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennykh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions]: per. s angl. M., izd. «Mir», 1976. 168 s.
5. Melihov A.N., Bershtejn L.S., Korovin S.Ya. Situacionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoj logikoj [Situational advising systems with fuzzy logic], M., izd. «Nauka», 1990, 272 s.
6. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika [Situational management: theory and practice], 2 izd. M., izd. «URSS», 2021. 288 s.
7. SHapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]. M., izd. «BINOM. Laboratoriya znani», 2006, 752 s.
8. Forsajt D., Pons ZH. Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podhod [Computer vision. Modern approach]. M., Izd. «Vil'yams», 2004, 928 s.
9. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij [Digital imaging]. M., izd. «Tekhnosfera», 2005, 1070 s.
10. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision. USA, California, Cole Publishing Company, 1999, 770 s.
11. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing, London, Pearson, 2018, 1168 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70; E-mail: pashka1602@rambler.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamilya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Михаил Вячеславович Хачумов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, 152021, с. Веськово, Ярославская обл.; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9. E-mail: khmike@inbox.ru

Mikhail V. Khachumov, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, 152021, Veskovo, Russian Federation; Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9. E-mail: khmike@inbox.ru

Статья поступила в редакцию/ the article was submitted 29.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ approved after reviewing 01.11.2022.

Принята к публикации/ accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.041>

Реализация легкой криптографии на эллиптических кривых для безопасности и конфиденциальности в киберфизических системах интеллектуального экологического мониторинга Северного морского пути

Д.Е. Баскаков¹ dmitriy.e.baskakov@gmail.com, Е. Ю. Кузнецова² helhena@mail.ru,

А.Л. Стариченков³ allstar72@mail.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Развитие Интернета вещей создало множество новых возможностей для надежного и устойчивого развертывания киберфизических систем. Основные элементы киберфизической системы экологического мониторинга — это сенсорные устройства, которые имеют значительные ограничения ресурсов по условиям эксплуатации в условиях Северного морского пути, в том числе недостаточную емкость батареи, вычислительные возможности контроллера управления, ограничения по физической безопасности и режимам работы в особых климатических условиях. Такие ограничения ресурсов актуализируют разработку облегченных криптографических протоколов и алгоритмов удаленной идентификации, аутентификации и авторизации пользователей и устройств. В статье рассматривается удаленная аутентификация пользователей интеллектуальной системы экологической безопасности на основе облегченной криптографии. Реализация облегченных криптографических протоколов возможна, в том числе, с использованием эллиптических кривых. При этом облегченная криптография не рассматривается как альтернатива классической, она представлена весомым дополнением для распределенных киберфизических систем, которое позволяет обеспечивать адекватную и компромиссную безопасность в средах с ограниченными ресурсами и мощностями.

Ключевые слова. Киберфизические системы, криптография, экологический мониторинг, эллиптические кривые

Для цитирования: Баскаков Д.Е., Кузнецова Е. Ю., Стариченков А.Л. Реализация легкой криптографии на эллиптических кривых для безопасности и конфиденциальности в киберфизических системах интеллектуального экологического мониторинга Северного морского пути. 2022. № 4 часть 1, С. 185—192.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.041>

Implementation of Lightweight Elliptic Curve Cryptography for Security and Privacy in Cyber-Physical Systems of Intelligent Environmental Monitoring for the Northern Sea Route

D.E. Baskakov¹ dmitriy.e.baskakov@gmail.com, E. Yu. Kuznetsova² helhena@mail.ru, A.L. Starichenkov³

allstar72@mail.ru

¹SPbPU of Peter the Great, St. Petersburg, 2Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

³Saint-Petersburg Electrotechnical University LETI, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The development of the Internet of Things has created many new opportunities for the reliable and sustainable deployment of cyber-physical systems. The main elements of any environmental monitoring CS are sensor devices that have significant resource limitations in terms of operating conditions in the conditions of the Northern Sea Route, including insufficient battery capacity, computing capabilities of the control controller, limitations on physical security and modes of operation in special climatic conditions. Due to such resource limitations, the development of lightweight cryptographic protocols and algorithms for remote identification, authentication and authorization of users and devices is very relevant. Remote authentication of users of an Intelligent Environmental Security System based on LWC is proposed for the first time in the domestic literature and ensures that two parties establish a secure and reliable session key, which in the future can become an industry standard for IoT. The implementation of LWC in theory is also possible using elliptic curves. At the same time, we do not consider LWC as an alternative to classical cryptography. Rather, it is an important addition to distributed CS, which allows you to provide adequate and compromise security in environments with limited resources and capacities.

Keywords. Cyber-Physical Systems, Environmental Monitoring, Reliability, Elliptic Curve

For citation: Dmitriy E. Baskakov, Elena Y. Kuznetsova, Aleksey L. Starichenkov Implementation of Lightweight Elliptic Curve Cryptography for Security and Privacy in Cyber-Physical Systems of Intelligent Environmental Monitoring for the Northern Sea Route of Russia, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 185—192.

Введение

Интеллектуальная система экологической безопасности (ИСЭБ) Северного морского пути (СМП), теоретические основы разработки которой представлены в работах [1, 2], представляет собой иерархическую распределенную киберфизическую систему (КС) последнего поколения с целым рядом перспективных инженерных и научных решений. Количество управляющих элементов и модулей ИСЭБ исчисляется тысячами, что влечет за собой нетривиальные вызовы для инженеров и конструкторов, которые проектируют подобные системы [3]. Большое количество устройств и сенсоров, взаимодействующих между собой в режиме реального времени в суровых условиях Крайнего Севера России, требуют от проектировщиков нового взгляда в том числе и на вопросы информационной безопасности распределенных систем аналогичного уровня.

Традиционные системы и модели информационной безопасности базируются на статических моделях и свойствах. При этом различается методология и парадигма безопасности на программном и аппаратном уровнях. Таким образом, при создании ИСЭБ, ее внедрении и сопровождении необходимы новые пионерные решения в том числе и в области идентификации, аутентификации и предоставлении прав доступа как пользователям системы, так и интеллектуальным датчикам и алгоритмам, которые будут применяться в ИСЭБ. Дополнительным фактором, требующим пересмотра традиционных подходов в области безопасности, является применение интеллектуальных алгоритмов управления и принятия решений в ИСЭБ, что влечет за собой кратное увеличение сложности архитектуры проектируемого решения [4].

Протоколы шифрования с открытым ключом, предназначенные для защищенного обмена информацией между устройствами, выполняются, обычно, программным обеспечением. Но датчики интернета вещей (Internet of Things, IoT) в ИСЭБ не могут позволить себе такой расход энергии и памяти, который требуется для протоколов шифрования. В условиях СМП потребляемая энергия устройств ИСЭБ и их мощность становится существенным фактором ограничения при использовании специализированных устройств для шифрования конфиденциальной информации в целях безопасности. Создание новых подходов и алгоритмов безопасности при проектировании ИСЭБ становится важнейшей инженерной задачей, для обеспечения эффективного экологического мониторинга СМП.

Киберфизическая ИСЭБ

Киберфизическая ИСЭБ проектируется с двумя ключевыми уровнями информационного взаимодействия, которые представлены на рисунке 1. При этом самым важным этапом реализации алгоритмов шифрования будет обеспечение безопасности так называемого транспортного уровня передачи данных между

физическим и киберфизическим уровнями (Datagram Transport Layer Security, DTLS)

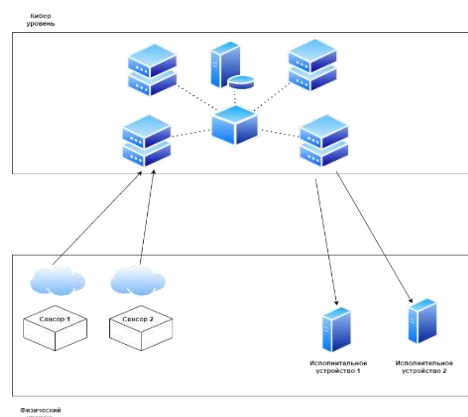


Рис. 1. Киберфизическая система

Обмен конфиденциальной информацией на каждом из уровней и между ними должен сопровождаться обязательными сервисами идентификации и аутентификации в том числе при предоставлении прав пользователям при работе с системой. Требуемые уровни безопасности можно обеспечить путем создания либо принципиально новых криптографических алгоритмов и устройств, либо с применением практики легкой криптографии на эллиптических кривых с адаптацией под заявленные критерии безопасности и целостности информации.

Впервые термин «киберфизическая система» (Cyber-Physical Systems, CPS) появился в 2006 году в National Science Foundation. КС — это система, в которой вычислительные и коммуникационные компоненты управляют и контролируют такие физические явления, как давление, температура, свет и т.д. [6]. Данные измеряются с помощью специализированных датчиков и передаются при помощи элементов связи в контроллеры и специализированные программы. Контроллеры и программы принимают на основе заданной целевой функции и алгоритма управления решения и действия, которые при помощи средств связи передаются исполнительным механизмам и далее вносят изменения в физическую среду и явления. КС — это искусственные системы, разработанные и созданные человеком, которые используют парадигму бесшовной интеграции вычислительных алгоритмов и физических компонентов этой системы [3]. На практике такая интеграция означает, что для описания такой системы мы не можем сосредоточиться только на физической и аппаратной части или только на программно-алгоритмическом уровне. Нам одновременно нужно описывать оба важнейших компонента системы: аппаратный и программный уровни. На рисунке 2 представлен прототип киберфизической системы на примере ИСЭБ: С - сенсоры, ИУ - управляющие устройства и К - контроллеры, которые и формируют команды для управляющих устройств и алгоритмов для систем 1 и 2.

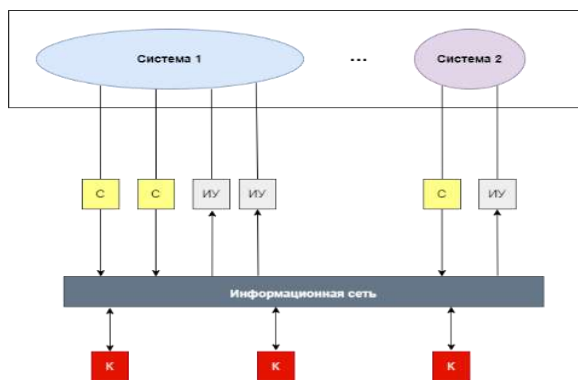


Рис. 2. Киберфизическая ИСЭБ

Облегченные криптографические алгоритмы — это криптографические алгоритмы прежде всего с низкими вычислительными затратами, которые могут быть применены для обеспечения требуемой безопасности при наличии заданных ограничений. Концепция LWC подразумевает некоторые конструктивные ограничения, которые оцениваются для отдельно для аппаратного и программного уровней.

Аппаратная реализация оценивается по двум параметрам — размер микросхемы и энергопотребление (при этом аппаратная оценка может включать иные интегральные показатели, которые выходят за рамки данной статьи [7]).

В качестве основных параметров нашей программной модели для целей LWC ИСЭБ мы используем:

размер кода (количество строк алгоритма, $strs$)[3];

объем оперативной памяти устройства или контроллера устройства в том числе (ram).

Время выполнения программы или алгоритмы отлично от нуля и зависит от ряда факторов:

временная сложность алгоритма соответствующей программы;

ввод и поступление данных в программу и алгоритм[9];

качество скомпилированного кода как функция;

применение машинных инструкций и сторонних пакетов и программ, которые оказывают влияние на время выполнение программы.

Алгоритм есть набор инструкций для выполнения некоторой задачи [3]. Временная сложность алгоритма обозначается через O и определяется как скорость работы алгоритма, являясь прежде всего функций времени t и n , где t и n есть время работы алгоритма и количество операций. Таким образом, верхняя оценка работы алгоритма LWC есть $O(n)$, то есть время работы алгоритма в худшем случае.

Рассматривая входные экологические данные больших размеров (многомерные массивы наблюдений, или длинные записи в формате String) для оценки такой величины, как порядок роста времени работы алгоритма, мы будем анализировать асимптотическую эффективность алгоритмов, оценка которой нам потребуется для LWC. То есть нас интересует только то, как время работы алгоритма растет с увеличением размера входных данных в пределе в случае роста этих данных до бесконечности [8]. Для экологических данных мы теоретически можем задать такое ограничение сверху.

В нашем случае асимптотически более эффективный алгоритм будет и более производительным для задач управления и экологического мониторинга [4]. Но при этом для задач идентификации и аутентификации нас интересует время работы в худшем случае. При этом в общем случае для экологического мониторинга весьма актуальным бывает и запрос на оценку времени работы алгоритма вне зависимости от входных данных.

Введем следующую лемму 1:

Простота программной реализации LWC не влечет за собой простоту аппаратной реализации LWC. Обратное утверждение тоже верно.

Другими словами, простой для программной реализации алгоритм не обязательно прост для аппаратного обеспечения и наоборот. Данная лемма может нами постулироваться как Требование №1 при проектировании системы криптографической защиты ИСЭБ в виде минимизации функции двух переменных:

$$Q_1 = \min(O_{software}, O_{hardware}) \quad (1),$$

где Q_1 — интегральное требование 1 к LWC ИСЭБ как функция программной $O_{software}$ и аппаратной $O_{hardware}$ сложности. В общем случае программная сложность есть функция от количества строк, а аппаратная от количества микросхем с заданным уровнем сложности. Но мы специально вводим данные значения как функции, чтобы не ограничивается описанными выше требованиями.

В настоящее время LWC активно используется в нескольких областях:

Радиочастотная идентификация.

Имплантируемые медицинские устройства, электронные биометрические паспорта [9]

Современные автомобили с применением IoT [10].

Для любой КС, чтобы выдержать сложные атаки, желательно применение криптографических алгоритмов с большим ключом. Но такие криптоалгоритмы требуют серьезных вычислительных мощностей, что некоторые теоретические и практические исследования, зачастую, не учитывают. [11].

Именно компромисс между безопасностью и производительностью и между безопасностью и низкой стоимостью является по сути мотивацией применения LWC в ИСЭБ [Click or tap here to enter text.](#) Суровые условия Крайнего Севера России, особые условия эксплуатации и требования по безопасности и отказоустойчивости позволяют говорить о применении особого подхода к криптографии, в рамках которого парадигма LWC представляется наиболее актуальной [12].

В общем случае целевая функция применения LWC будет равна предикату вида:

$$Q_{LWC} = \max(S, V) \parallel \max(S, P) \parallel \max(P, V). \quad (2)$$

где Q_{LWC} — целевая функция LWC; Security, S — функция безопасности, Performance, P-функция производительности, а Value, V-функция экономической добавленной стоимости ИСЭБ или конкретного его модуля или простая функция стоимости.

В таком случае мы решаем оптимизационную задачу используя алгоритм Парето или с применением динамического программирования. На рисунке 3 продемонстрирована триада

оптимизационной задачи LWC с кратким перечислением ключевых факторов, которые влияют на итоговое решение.



Рис. 3. Триада оптимизационной задачи для ИСЭБ

Мы можем резюмировать основные критерии к производительности LWC в виде программных требований следующим образом:

аппаратная реализация небольшого размера с низким энергопотреблением или независимым энергопотреблением (солнечные батареи, например);

быстрая и компактная реализация программного обеспечения;

простая и гибкая реализация, невысокая стоимость внедрения, возможность модернизации и обновления;

низкая стоимость сопровождения;

минимальный размер ключа.

Размер ключа и требования к нему опишем ниже, а вот остальные требования можно использовать как аксиомы при проектировании системы криптографической защиты ИСЭБ.

Чтобы реализовать алгоритмы в рамках этих ограничений необходимо применять следующие подходы:

Использовать традиционные алгоритмы шифрования типа DES с минимальными вычислительными и энергетическими затратами.

Модифицировать существующие алгоритмы традиционной криптографии под задачи LWC. Данный подход сопряжен с существенной исследовательской частью, ибо традиционные системы шифрования очень редко имеют ограничения на энергопотребление. В качестве перспективного подхода видится применение эллиптических кривых в алгоритмах LWC.

Создавать принципиально новые алгоритмы и модели.

С практической точки зрения применительно к отечественной практике возможно применение и использование методов и подходов в области шифрования, которые внедрены в РФ в виде ГОСТов.

Использование эллиптических кривых в криптографических целях было впервые предложено Н. Коблицем и В. Миллером в 1985 году. Многолетние интенсивные исследования этих систем подтвердили их полезные свойства и привели к открытию множества эффективных методов их реализации [13].

С 1998 года началось активное освоение эллиптических кривых для решения криптографических задач, таких, как цифровая подпись. Применение эллиптических кривых было закреплено в стандартах США ANSI X9.62 и FIPS 186-

2. В 2001 году аналогичный стандарт, ГОСТ Р 34.10-2001, был принят и в России. При этом на текущий момент существует версия данного стандарта в виде ГОСТ Р 34.10-2018.

Основное достоинство криптографических алгоритмов и систем на основе эллиптических кривых в сравнении с обычными криптосистемами состоит в том, что эллиптические кривые обеспечивают существенно более высокую криптостойкость при равных затратах вычислительных и энергетических ресурсов. Или существенно меньшую трудоемкость при равной криптостойкости.

Это объясняется тем, что для вычисления обратных функций на эллиптических кривых известны только алгоритмы с экспоненциальным ростом трудоемкости, тогда как для обычных систем предложены субэкспоненциальные методы. В результате тот уровень стойкости, который достигается, скажем, в RSA при использовании 1024-битовых модулей, в системах на эллиптических кривых реализуется при размере модуля 160 бит при обеспечении равного уровня криптостойкости [14].

Шифрование на эллиптических кривых в ИСЭБ на основе ГОСТ

Российский стандарт электронной подписи ГОСТ Р 34.10-2018, как и его предшественники ГОСТ Р 34.10-2012 и ГОСТ Р 34.10-2001, основан на вычислениях в группе точек эллиптических кривых и имеет структуру, близкую к схеме ECDSA. В определенном смысле ГОСТ Р 34.10-2018, ГОСТ Р 34.10-2012 и ГОСТ Р 34.10-2001 являются аналогами ГОСТ Р 34.10-94 при замене класса используемых циклических групп с мультипликативных групп простых полей на группы точек эллиптических кривых – точно так же, как ECDSA является аналогом DSA при аналогичных изменениях. Схемы ГОСТ Р 34.10-94 и DSA по структуре преобразований, в свою очередь, близки к классической схеме подписи Эль-Гамала (1984 год), в частности, основываются на том же классе теоретико-сложностных предположений о трудности задачи нахождения дискретного полулогарифма.

Строгое обоснование стойкости ГОСТ Р 34.10-2001 (переносимое без каких-либо изменений на ГОСТ Р 34.10-2012 и ГОСТ Р 34.10-2018) в условиях принятых в мировой криптографической практике предположений можно найти, например, в работе [15].

Криптографическая стойкость стандарта ГОСТ Р 34.10-2018 базируется на трудности решения задачи нахождения дискретного полулогарифма в группе точек эллиптической кривой. Напомним, что группа точек эллиптической кривой над конечным полем вычетов по модулю N – это множество решений уравнения вида:

$$y^2 = x^3 + ax + b \pmod{N} \quad (3)$$

где a и b являются определяющими эллиптическую кривую параметрами (приводится описание в часто используемой форме Вейерштрасса), т.е. $a, b \in F_p$ и $4a^3 + 27b^2$

не сравнимо с нулем по модулю p .

Инвариантом эллиптической кривой называется величина $J(E)$, которая удовлетворяет тождеству:

$$J(E) = 1728 \frac{4a^3}{4a^3 + 27b^2} \pmod{p} \quad (4)$$

Коэффициенты a и b эллиптической кривой E по известному инварианту $J(E)$ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} a \equiv 3k \pmod{p}, \\ b \equiv 2k \pmod{p}, \end{cases} \quad (5)$$

При этом:

$$k \equiv \frac{J(E)}{1728 - J(E)} \pmod{p} \quad (6),$$

где:

$$J(E) \neq 0 \text{ Или } 1728 \quad (7)$$

Пары (x, y) , которые удовлетворяют тождеству (3), называются *точками эллиптической кривой E*; x, y – соответственно *координатами точки x и y этой кривой*.

Точка эллиптической кривой обозначается $Q(x, y)$ или просто Q . Две точки эллиптической кривой равны, если равны их соответствующие x - и y -координаты.

На множестве всех точек эллиптической кривой E введем операцию сложения, которую будем обозначать знаком "+". Для двух произвольных точек $Q(x_1, y_1)$ и $Q(x_2, y_2)$ эллиптической кривой E рассмотрим несколько случаев.

Для точек Q_1 и Q_2 , координаты которых удовлетворяют условию $x_1 \neq x_2$, их суммой называется точка $Q_3(x_3, y_3)$, координаты которой определяются сравнениями вида:

$$\begin{cases} x_3 \equiv \lambda^2 - x_1 - x_2 \pmod{p}, \\ y_3 \equiv \lambda(x_1 - x_3) - y_1 \pmod{p}, \end{cases} \quad (8)$$

Где:

$$\lambda \equiv \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \pmod{p} \quad (9)$$

Если выполнены равенства вида $x_1 = x_2$ и $y_1 = y_2 \neq 0$, то координаты точки Q_3 , определяются следующим образом:

$$\begin{cases} x_3 \equiv \lambda^2 - 2x_1 \pmod{p}, \\ y_3 \equiv \lambda(x_1 - x_3) - y_1 \pmod{p}, \end{cases} \quad (10)$$

Где:

$$\lambda \equiv \frac{3x_1^2 + a}{2y_1} \pmod{p} \quad (11)$$

Таким образом, для задания кривой достаточно зафиксировать параметры N, a и b , а для использования со стандартом ГОСТ Р 34.10-2018 также зафиксировать некоторую ее циклическую подгруппу и точку (x_0, y_0) являющуюся порождающим элементом этой подгруппы.

Особенностью стандарта ГОСТ Р 34.10-2018 является то, что в документе не зафиксированы явно какие-либо кривые, рекомендуемые для использования, а присутствует только набор требований к ним. Для конкретных примеров кривых, приведенных в стандарте, оговорено, что они должны использоваться сугубо в тестовых целях.

Чтобы создать для ИСЭБ универсальный чип для эллиптических кривых необходимо провести разбиение криптографических вычислений на составные части.

Криптография на эллиптических кривых основана на модульной арифметике. В проектируемом чипе рекомендуется отдельную схему посвятить модульному умножению. Обычно модульный множитель имеет дело с 16- или 32-разрядными двоичными числами. Лучше, если чип будет

способен работать с 256-битными числами для более высокой скорости. Более того, более длинные числа позволят снизить потребление энергии и повысить скорость вычислений. Другой ключевой для криптографии с эллиптическими кривыми операцией является обратное преобразование, которую тоже желательно реализовать на отдельной схеме. Это увеличит площадь чипа на 10-20%, зато наполовину или даже более сократит потребление энергии.

Реализацию программного обеспечения тоже лучше внедрять на аппаратном уровне для снижения энергопотребления и более высокой модульности конечного изделия. Дополнительным перспективным направлением видится и интеграция в рамках проектируемого чипа и модуля для машинного обучения для IoT, который обеспечит невысокое потребление энергии для ИСЭБ в условиях Крайнего Севера России. Примечательно, что западные прототипы подобных устройств позволяют снизить потребление энергии с 10 000 пико Ватт всего до 20 пико Ватт, то есть более чем в 500 раз.

При создании прототипа LWC для ИСЭБ на первом этапе необходимо установить связь между двумя субъектами или объектами на разных уровнях ИСЭБ. Алгоритм безопасного соединения выглядит следующим образом:



Рис. 4. Установка DTLC безопасного соединения

После установки соединения начинается процесс обмена данными в безопасном режиме. Для создания и поддержания такого режима мы предлагаем использовать вычислитель вида, представленного на рисунке 5.

В процессе шифрования предлагается применять в качестве прототипа криптографический ускоритель на эллиптических кривых в виде схемы представленной на рисунке 6.

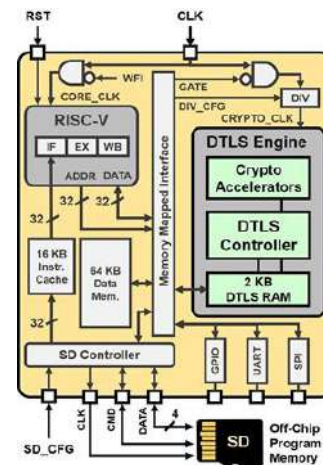


Рис. 5. DTLC вычислитель/сервер [16].

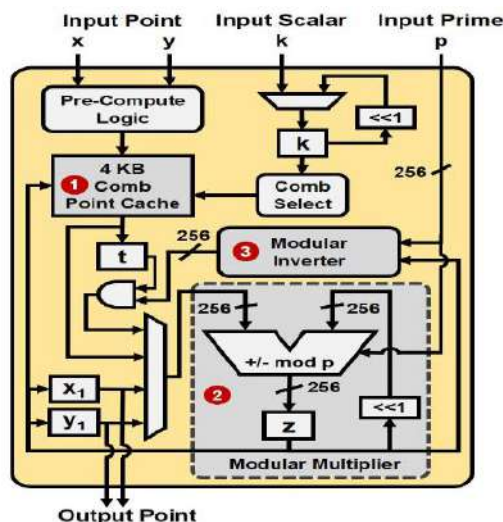


Рис. 6. Криптографический ускоритель на эллиптических кривых [16]

Перечислим наиболее важные архитектурные особенности данного ускорителя:

низкое энергопотребление благодаря применению кэша в 4 КБ;

программный код и алгоритмы работают с числами длиной 256 бит и реализованы на аппаратном уровне для повышения скорости и снижения энергопотребления;

используется модульный инвертер в виде отдельной платы для ускорения работы и снижения энергопотребления.

Архитектурная схема DTLC контроллера и крипто ускорителя выглядит следующим образом:

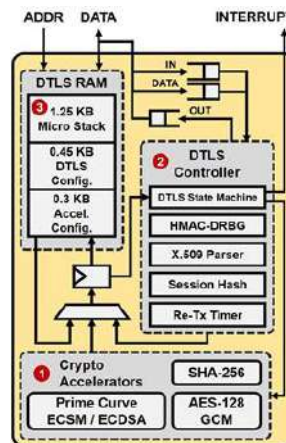


Рис. 7. Архитектура DTLC и крипто ускорителя [16]

Инженерная реализация предполагаемого решения позволит обеспечить необходимый уровень информационной безопасности в процессе эксплуатации ИСЭБ СМП в соответствии с ГОСТ Р 34.10-2018.

Заключение

Проектирование, внедрение и эксплуатация ИСЭБ представляют собой сложную инженерную и конструкторскую задачи. ИСЭБ функционирует в разных контурах управления и принятия решений с разнородными данными и пользователями в режиме времени, близкого к реальному. Процессы идентификации, аутентификации и авторизации пользователей и устройств необходимо реализовывать с учетом жестких ограничений как на энергопотребление устройств и сенсоров, так и лимитированное использование вычислительных ресурсов в условиях Крайнего Севера. Предложенная реализация прототипа обмена данными с применением легкой криптографии на эллиптических кривых позволяет достигнуть заявленные эксплуатационные характеристики с достаточным уровнем безопасности в соответствии с ГОСТ РФ.

Литература

1. Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю. Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. N 1. С. 121 – 128.
2. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В., Кузнецова Е.Ю. Интеллектуальная система экологической безопасности – основа Арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции. 09-10 ноября 2021 г. – СПб.: ИПТ РАН. Том 1. С. 8-12.
3. Sato K. et al. A modeling technique utilizing feedback control theory for performance evaluation of IoT system in real-time // 2015 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015.
4. Baskakov D., Arseniev D. On the Computational Complexity of Deep Learning Algorithms // Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 220. P. 343–356.
5. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models // Sensors (Switzerland). MDPI AG, 2015. Vol. 15, № 3. P. 4837–4869.
6. Lee E.A. Cyber physical systems: Design challenges // Proceedings - 11th IEEE Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, ISORC 2008. 2008. P. 363–369.
7. Baskakov D., Shkodyrev V. Deep Predictive Control // Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 220. P. 333–342.
8. Dmitry Arseniev D.B.J.K.V.S. 2nd International Conference Cyber-Physical Systems and Control CPS&C'2021 // Software Engineering Principles Apply to Artificial Intelligence Systems. St. Petersburg, Russia, 2021. P. 1–12.

9. Ghoreishizadeh S.S. et al. A lightweight cryptographic system for implantable biosensors // IEEE 2014 Biomedical Circuits and Systems Conference, BioCAS 2014 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. P. 472–475.
10. Castiglione A. et al. Securing the internet of vehicles through lightweight block ciphers // Pattern Recognit Lett. North-Holland, 2020. Vol. 135. P. 264–270.
11. Wu J., Detchenkov I., Cao Y. A study on the power consumption of using cryptography algorithms in mobile devices // Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS. IEEE Computer Society, 2016. Vol. 0. P. 957–959.
12. Cherrueau R.A. et al. Lightweight Cryptography for Embedded Systems – A Comparative Analysis // Data Privacy Management and Autonomous Spontaneous Security. Springer Verlag, 2014. Vol. 8247 LNCS. P. 333–349.
13. Koblitz N. Introduction to Elliptic Curves and Modular Forms. New York, NY: Springer New York, 1993. Vol. 97.
14. Рябко Б.Я. Основы современной криптографии. Второе. Москва: Горячая линия- Телеком, 2013. 1–232 p.
15. Варновский Н.П., Varnovskii N.P. Стойкость схем электронной подписи в модели с защищенным модулем // Дискретная математика. Steklov Mathematical Institute, 2008. Vol. 20, № 3. P. 147–159.
16. Banerjee U. et al. An energy-efficient reconfigurable DTLS cryptographic engine for End-to-End security in iot applications // Dig Tech Pap IEEE Int Solid State Circuits Conf. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Vol. 61. P. 42–44.

References

1. Malygin I.G., Kuznetsova E.Yu. Proposals for the development of an intelligent system for managing the environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. 2022. V. 1. N 1. S. 121 – 128.
2. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V., Kuznetsova E.Yu. Intelligent system of environmental safety - the basis of the Arctic intelligent multimodal transport corridor of the Russian Federation // Transport of Russia: problems and prospects - 2021: materials of the International scientific and practical conference. November 09-10, 2021 - St. Petersburg: IPT RAS. Volume 1. S. 8-12.
3. Sato K. et al. A modeling technique utilizing feedback control theory for performance evaluation of IoT system in real-time // 2015 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015.
4. Baskakov D., Arseniev D. On the Computational Complexity of Deep Learning Algorithms // Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 220. P. 343–356.
5. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models // Sensors (Switzerland). MDPI AG, 2015. Vol. 15, № 3. P. 4837–4869.
6. Lee E.A. Cyber physical systems: Design challenges // Proceedings - 11th IEEE Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, ISORC 2008. 2008. P. 363–369.
7. Baskakov D., Shkodyrev V. Deep Predictive Control // Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Vol. 220. P. 333–342.
8. Dmitry Arseniev D.B.J.K.V.S. 2nd International Conference Cyber-Physical Systems and Control CPS&C'2021 // Software Engineering Principles Apply to Artificial Intelligence Systems. St. Petersburg, Russia, 2021. P. 1–12.
9. Ghoreishizadeh S.S. et al. A lightweight cryptographic system for implantable biosensors // IEEE 2014 Biomedical Circuits and Systems Conference, BioCAS 2014 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. P. 472–475.
10. Castiglione A. et al. Securing the internet of vehicles through lightweight block ciphers // Pattern Recognit Lett. North-Holland, 2020. Vol. 135. P. 264–270.
11. Wu J., Detchenkov I., Cao Y. A study on the power consumption of using cryptography algorithms in mobile devices // Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS. IEEE Computer Society, 2016. Vol. 0. P. 957–959.
12. Cherrueau R.A. et al. Lightweight Cryptography for Embedded Systems – A Comparative Analysis // Data Privacy Management and Autonomous Spontaneous Security. Springer Verlag, 2014. Vol. 8247 LNCS. P. 333–349.
13. Koblitz N. Introduction to Elliptic Curves and Modular Forms. New York, NY: Springer New York, 1993. Vol. 97.
14. 3. Ryabko B.Ya. Fundamentals of modern cryptography. Second. Moscow: Hotline-Telecom, 2013. 1–232 p.
15. Varnovsky N.P., Varnovskii N.P. Stability of electronic signature schemes in a model with a protected module // Discrete Mathematics. Steklov Mathematical Institute, 2008. Vol. 20, No. 3. P. 147–159.
16. Banerjee U. et al. An energy-efficient reconfigurable DTLS cryptographic engine for End-to-End security in iot applications // Dig Tech Pap IEEE Int Solid State Circuits Conf. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Vol. 61. P. 42–44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Евгеньевич Баскаков, аспирант СПбПУ Петра Великого, Институт компьютерных наук и технологий, Высшая школа киберфизических систем и управления, MBA, 195251, Санкт-Петербург, Гражданский проспект 28, 16-й учебный корпус, e-mail: dmitriy.e.baskakov@gmail.com

Dmitry E. Baskakov, PhD student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Computer Science and Technology, Higher School of Cyber-Physical Systems and Control, MBA, 195251, St. Petersburg, Grazhdansky pro-spekt 28, 16th academic building, e-mail: dmitriy.e.baskakov@gmail.com

Елена Юрьевна Кузнецова, кандидат технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7,, e-mail: helhena@mail.ru

Elena Y. Kuznetsova, Ph.D., 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, Russia, 198035, Russian Federation, e-mail: helhena@mail.ru

Алексей Леонидович Стариченков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5; e-mail: allstar72@yandex.ru

Alexey L. Starichenkov, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: allstar72@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.042>

Производительность морских видеосистем передачи изображений повышенной детальности

С.А. Селиверстов¹ seliverstov_s_a@mail.ru, А.А. Халтурин⁴ artyomatwork247@mail.ru,

Е.Р. Шафхатов⁴ ershat11@mail.ru, Ш.С. Фахми^{1,2} shakeebf@mail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ⁴Санкт-Петербургский горный университет

Аннотация. На современном этапе развития интеллектуальных морских технологий необходимо включить в состав системы обработки изображений способ учёта степени детальности и количества объектов на изображениях. В данной статье вычислена производительность алгоритмов на основе различных размеров блоков дискретного косинусного преобразования в зависимости от степени детальности объектов изображения. Для достижения поставленной задачи сжатия цветных изображений, необходимо их преобразовать в черно-белого полутонового формат. Формат Y - компонент яркости и Cb и Cr - цветоразностные компоненты изображения позволяет достичь лучшие значения коэффициента сжатия. Предложен адаптивный алгоритм сжатия морских изображений, на основе предварительной группировки блоков изображения в зависимости от степени детальности и контрастности путём определения областей границ объектов. Полученные блоки с границами подвергаются сжатию с низким коэффициентом сжатия, а блоки без границ сжимаются с высоким коэффициентом сжатия. Результаты моделирования алгоритмов показали, что информационные показатели системы обработки морских изображений и производительность предложенного метода выше по сравнению с известным методом сжатия JPEG.

Ключевые слова: Производительность, сжатие и восстановление, морские сюжеты, коэффициент сжатия, точность восстановления и сложность системы передачи

Для цитирования: Селиверстов С.А., Халтурин А.А., Шафхатов Е.Р., Фахми Ш.С., Производительность морских видеосистем передачи изображений повышенной детальности, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 193—200.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.042>

Performance of marine video systems for transmitting images of increased detail

Svyatoslav A. Seliverstov¹ seliverstov_s_a@mail.ru, Artyom A. Khalturin⁴ artyomatwork247@mail.ru, Ershat R.

Shafhatov⁴ ershat11@mail.ru, Shakeeb S. Fahmi^{1,2}shakeebf@mail.ru,

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation,

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation,

³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

⁴Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. At the present stage of the development of intelligent marine technologies, it is necessary to include in the image processing system a method for taking into account the degree of detail and the number of objects in the images. In this article, the performance of algorithms based on different sizes of discrete cosine transformation blocks is calculated depending on the degree of detail of the image objects. To achieve this task, the RGB color image format is converted to a black-and-white halftone YCbCr format for further compression. The Y - component brightness format and Cb and Cr - color-difference components of the image allows you to achieve the best values of the compression ratio. An adaptive algorithm for compressing marine images is proposed, based on the preliminary grouping of image blocks depending on the degree of detail and contrast by determining the areas of the boundaries of objects. The resulting blocks with boundaries are compressed with a low compression ratio, and blocks without boundaries are compressed with a high compression ratio. The results of the analysis showed that the information indicators of the marine image processing system and the performance of the proposed method are higher compared to the known JPEG compression method.

Keywords: Performance, compression and recovery, marine scenes, compression ratio, recovery accuracy and transmission system complexity.

For citation: Svyatoslav A. Seliverstov, Artyom A. Khalturin, Ershat R. Shafhatov., Shakeeb S. Fahmi, Performance of marine video systems for transmitting images of increased detail, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 193—200.

Введение

Деятельность человека в океане становится все более частой и включает морские перевозки,

морскую торговлю, морское рыболовство и военную деятельность [1]. Суда являются важными носителями для человеческой деятельности в

океане, поэтому мониторинг морских судов и управление ими имеют решающее значение.

С появлением автономных транспортных средств автономные суда привлекают все больше внимания, особенно для грузовых судов дальнего и ближнего плавания и специальных судов, участвующих в военных операциях с высоким риском [2].

Проблемы мониторинга и обеспечения соблюдения в обширных, часто удаленных районах океана, где развертывание средств наблюдения, таких как патрульные суда, радары берегового базирования и самолеты, нецелесообразно или является чрезмерно дорогостоящим [3,4].

Развитие технологий наблюдения, цифровых камер и субмикронных технологий привлекли большое внимание исследователей и разработчиков систем обработки изображений, в результате стало возможным передачу больших объемов сжатых изображений и видео, практически без потери качества.

Резкий скачок в телекоммуникационных технологиях позволил внедрение и применение их в таких областях, как наблюдение за морскими судами, управление морскими судами, обнаружение и распознавание нарушителей, контроль акваторий с высоким интенсивным движением судов и т.д. [5,6]

Наиболее важными приложениями телекоммуникационных технологий являются беспроводные сенсорные сети (БСС) [7,8]. Устройства БСС, включая мобильные камеры, достигли 26 миллиардов узлов к 2020 году и намерены достичь 100 миллиардов узлов к 2025 году [9]. Поэтому, без сомнения, WSNS может предоставить огромные возможности для обработки и передачи морских сюжетов повышенной детальности в реальном времени. При этом наиболее острой проблемой при передаче больших объемов таких визуальных данных является задача сжатия при сохранении качества видеoinформации, полученной из камер наблюдения в акваториях и из беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Изображения морской специфики повышенной детальности (контрастности) разделяются на три основных класса:

- 1) изображения с более 60% площади объекта к фону (рис. 1, 2 а);
- 2) изображения с 40-60% соотношения объекта к фону (рис. 1,2 б);
- 3) изображения с менее 40% площади объекта к фону (рис. 1,2 в).

Сущность всех алгоритмов сжатия изображения состоит в том, чтобы представить изображение с различными соотношениями площади объекта к фону, минимальным количеством битов без заметного ухудшения визуального качества распакованного изображения. Эти два условия противоречат друг другу по своей природе.



Рис. 1. Изображения повышенной детальности: а) объект более 60%; б) от 40-60% и в) менее 40%.

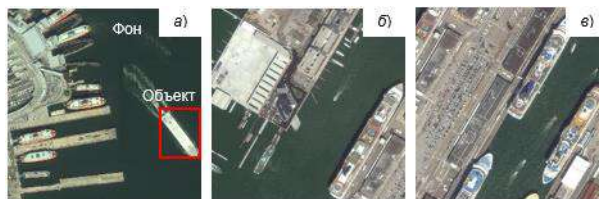


Рис. 2. Изображения с БПЛА повышенной детальности: а) объект более 60%; б) от 40-60% и в) менее 40%.

В цифровом цветном изображении каждый цветовой пиксель, представляет собой сочетание трёх компонентов красный (R), зеленый (G) и синий (B), каждый из которых в свою очередь представляет собой один байт (8 бит) данных [10]. Кроме того, цветное изображение обычно содержит много избыточных данных и требует большого объема памяти. Для снижения затрат на передачу и хранение визуальных данных необходимо использовать корреляционные свойства сигнала изображений [11].

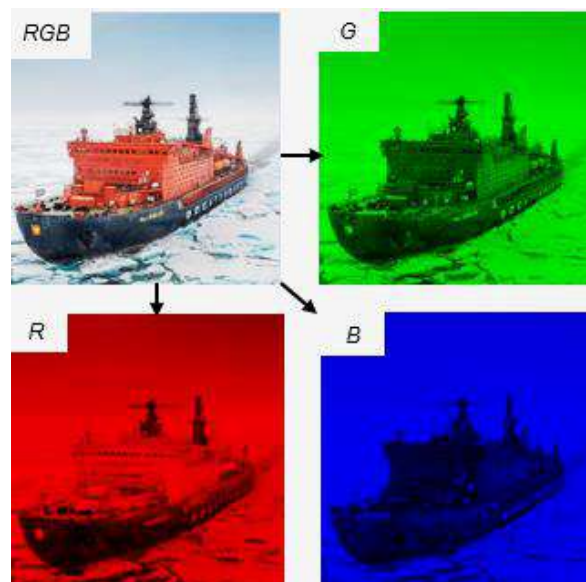


Рис. 3. Изображения с сочетанием трёх компонентов красный (R), зеленый (G) и синий (B)

Большинство цветных изображений записывается в модели RGB, которая является наиболее известной цветовой моделью. Однако модель RGB (рис. 3) не подходит для основных целей обработки изображений. Для сжатия считается, что представление в виде яркости, т.е. полутонового черно-белого изображения является удобным вариантом для сжатия по сравнению с RGB-форматом. Следовательно, в большинстве случаев на практике цветные изображения формата RGB, необходимо преобразовать в полутоновое черно-белое изображения, где на каждый пиксель отводится всего лишь один байт- яркости. Далее после выполнения сжатия, нужно обратно преобразовать их в цветные для отображения в нужном формате.

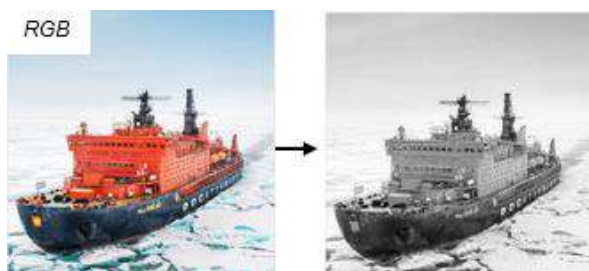


Рис. 4. Перевод изображения в полутоновое черно-белое изображение

Значение каждого пикселя на экране является яркостью и занимает один байт памяти, а для восстановления цветного кадра используются цветоразностные компоненты синего и красного цветов [10].

Другим немало важным фактором в достижении существенного роста степени сжатия является учет степени детализации изображения. Другими словами, число деталей на изображениях и контрастность прямо пропорционально влияют на занимаемую площадь объектов по отношению к фону. Чем больше деталей на изображениях, тем больше контуров, и, следовательно, больше площади объектов по сравнению с площадью фона.

На уровень детализации влияют следующие факторы:

- выбор кадра при съемке;
 - уровень и степень освещения;
 - выбор типа объектива;
 - кроп, т.е. вырезание фрагмента из изображения
- фактор матрицы цифрового фотоаппарата;
- установленное значение экспозапары.

В работе авторов [12] предложили новый алгоритм сжатия цветных изображений. После этапа предварительной обработки применяется преобразование ДКП, за которым следует итеративная фаза, включающая пороговое значение, квантование, деквантование и обратное ДКП. С целью получения наилучшей возможной степени сжатия следующим шагом является применение предлагаемого адаптивного сканирования, обеспечивающего для каждого (n, n) блока ДКП соответствующий $(n \times n)$ вектор, содержащий максимально возможное количество нулей в его конце. Последним шагом является применение модифицированного систематического кодера без потерь. Эффективность предложенной ими схемы подтверждается результатами.

Предложенный в работе [13] гибридный метод кодирования и декодирования видеoinформации, на основе сочетания двух подходов: дискретного вейвлет-преобразования и ДКП при кодировании источника изображений. Этот метод обеспечивает более низкую битовую скорость передачи данных, чем методы сжатия на основе классического JPEG стандарта, и хорошо подходит для любого цветного изображения с большим тривиальным фоном.

В данной статье рассматривается новый метод сжатия морских изображений, который обеспечивает баланс между степенью сжатия и качеством изображения за счет выполнения сжатия над теми областями изображения, где имеется высокая детальность, определяемая на этапе первичной обработки путём выделения границ (т.е. контуров)

объектов. Важно при этом определить требуемый объект (в нашем случае – морское судно), и выделить его от фона.

Предложенный метод классифицирует изображение как блоки с контурами (т.е. блоки, содержащие объект) и блоки без контуров (фон), затем фон изображения подвергается сжатию с потерями с низким качеством, а основной объект сжимается без потери качества.

Сжатие морских изображений

Спектральное сжатие

Система сжатия источника морских изображений состоит из трех тесно связанных процедур: кодирование источника, на основе ДКП, квантование и энтропийный кодирование канала. На рисунке 1(а) показана структурная схема кодера ДКП.

Принцип, лежащий в основе спектрального сжатия, на основе ДКП заключается в том, что пиксели в пределах своих локальных областей коррелированы и, следовательно, содержат избыточную информацию. Исходя из свойства корреляции яркостей пикселей, основная задача спектрального сжатия состоит в декорреляции и преобразовании сигнала из пространственной области в частотную, т.е. получение значений коэффициентов ДКП для последующего квантования. Следовательно, суть сжатия заключается в уменьшении количества бит-информации, необходимого для передачи изображений по каналу связи без существенной потери их качества. Уменьшение возможно только в тех областях, где имеется сходство значений яркостей соседних пикселей на исходном изображении.

Стандарт сжатия JPEG (основанный на ДКП) выполняет необходимое преобразование над раздельными блоками размера 8×8 исходного изображения, в результате преобразования будут получены коэффициенты ДКП. Затем степень сжатия достигается путем выполнения квантования каждого из полученных коэффициентов блока 8×8 .

Для выполнения ДКП предварительно исходное изображение делится на неперекрывающиеся блоки размером 8×8 или 16×16 , и для каждого блока вычисляется двумерный ДКП.

Процесс декодирования и восстановления сжатых коэффициентов включает те же функции, как в декодере, только в обратном порядке.

Важно отметить, что для типичных полутоновых изображений многие коэффициенты ДКП имеют значения, близкие к нулю; эти коэффициенты могут быть отброшены без существенной потери качества восстановленного изображения.

Двумерный ДКП пикселя матрицы $N \times N$ определяется следующим образом [11, 12]:

ДКП обозначается как двумерная матрица размером $N \times N$ и преобразуется с помощью следующей формулы:

$$ДКП(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(i)C(j)$$

$$\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} Пик(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N} \right]$$

где

сканированию для последующего кодирования по без потери качества и передачи по каналу связи.

Группа блоков (ГБ-II): Совокупность блоков, содержащие пиксели, которые находятся вблизи контуров объектов и составляют более 50% от общего числа пикселей в блоке. Данный блок имеет размер 8x8 и 16x16. Далее данные блоки также подвергаются ДКП, квантованию и зигзагообразному сканированию для последующего кодирования по без потери качества и передачи по каналу связи.

Группа блоков (ГБ-III): Данная группа блоков охватывает всю оставшуюся область – блоки изображения, где полностью отсутствует контуры объектов (т.е. фон) и они имеют размеры 16x16 и более. Данные блоки подвергаются дополнительному анализу для оценки степени однородности.

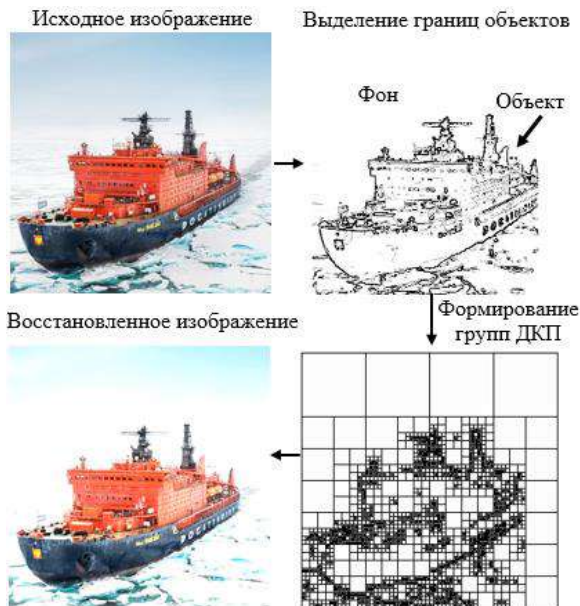


Рис. 5. Процедуры фильтрации и формирование неравномерной сетки для выполнения ДКП

Результаты экспериментов

Были протестированы различные размеры блоков: 8x8, 16x16 или 32x32. Каждый блок преобразуется в ДКП. Ясно, что преобразование ДКП концентрирует большую часть энергии блока в нескольких репрезентативных коэффициентах. Коэффициенты ДКП в каждом блоке затем равномерно квантуются с размерами шага квантования в зависимости от коэффициента ДКП. Размеры шагов представлены в матрице квантования, называемой Q-матрицей. Для компонентов яркости и цветности обычно используются различные матрицы добротности. Этот этап квантования определяет, как степень сжатия, так и качество распакованного изображения. Большие размеры шага квантования обеспечивают хорошее сжатие, но низкую визуальную производительность, в то время как малые размеры шага квантования обеспечивают хорошую визуальную производительность, но небольшое сжатие.

В качестве исходных морских сюжетов были выбраны изображения из компактной

представительной выборки, предложенной в работе авторов [14] (рис. 6).

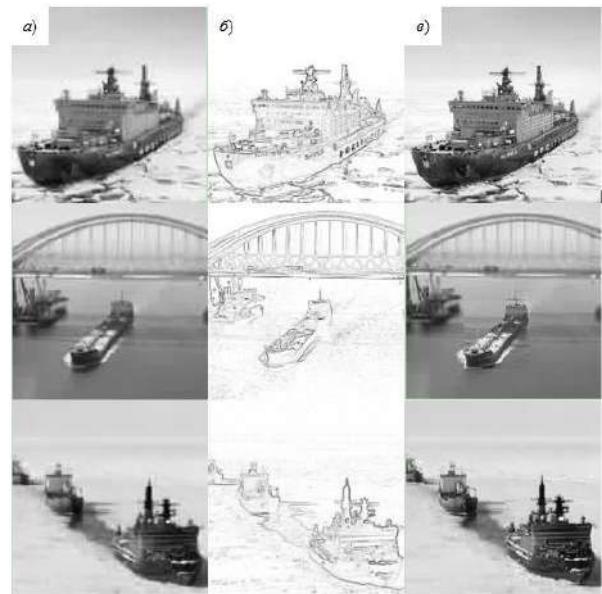


Рис. 6. Изображения морских судов, фильтрация и восстановленные после ДКП

Предлагаемая метод кодирования морских изображений реализован и протестирована для всех групп с различными размерами блоков (8 x 8, 16 x 16 и более) и с набором тестовых цветных изображений, показанных на рисунке 3 (формат размером 512 x 512 256x256). В качестве информационных показателей качества системы обработки морских сюжетов были выбраны следующие показатели:

- степень сжатия (СС) и определяется, как отношения объема исходного изображения к сжатому или, часто на практике оценивается, как битовая скорость передачи сжатых визуальных данных и измеряется в количестве бит на пиксель:

$$CC = \frac{\text{Объём исходного изображения}}{\text{Объём сжатых изображений}}$$

- отношение сигнала к шуму (С/Ш – англ. обозначение PSNR) и вычисляется, как логарифм отношения значения исходного сигнала к шуму (среднеквадратическому отклонению):

$$C/Ш = 10 \times \log_{10} \frac{255^2 \times 3}{\text{СКО}_Y \text{СКО}_{Cb} \text{СКО}_{Cr}};$$

где СКО - среднеквадратичная ошибка для каждого компонента исходного цветного изображения.

- битовая скорость передачи (БСП) сжатых изображений и определяется по следующей формуле:

БСП

СС

= $\frac{\text{число бит на пиксель в исходном изображении}}{\text{Сжатый объём}}$

В таб.1 показано сравнение результатов предложенного метода и известного метода сжатия изображений формата JPEG.

Среднее значение предлагаемого метода с небольшой скоростью передачи данных дает лучшие значения информационных показателей качества видеосистем управления и контроля морских судов: С/Ш, СС и БСП, чем известный стандарт сжатия методом JPEG.

В таб. 2 приведены результаты тестирования программ обработки и передачи морских сюжетов:

- производительность, вычисляемая, как числа кадров в секунду (P);
- время обработки одного кадров видеопотока морского сюжета (t);
- сложность, определяемая как числа операций на пиксель (O/C) при обработке одного кадра.

Заключение

В данной статье был предложен метод кодирования на основе блоков переменного размера, (рассматриваемые и анализируемые блоки имели размер: 8×8, 16×16, 32×32) в зависимости от количества объектов на изображениях путём предварительного определения областей и границ резкого перепада яркостей на изображениях.

Полученные результаты показывают, что предложенный метод адаптивного косинусного преобразования, на основе выделения контуров объектов повышает качество обнаружения границ объектов и дает лучшие значения информационных показателей качества (производительность, точность и степень сжатия) системы обработки морских сюжетов по сравнению с известным стандартом JPEG.

Разработанный метод позволяет реализовывать возможность совершенствования современных систем интеллектуального анализа видеоданных при развитии программных приложений в области обработки морских изображений, а также при построение продвинутых систем фильтрации, автономного поиска или контроля.

Разрешая проблему передачи больших данных, при одновременной возможности ускорения их обработки, повышаются интегральные показатели качества всей интеллектуальной системы с перспективой иерархической надстройки программно-аппаратных элементов, что позволяет говорить о появлении принципиально новых интеллектуальных системах следующего технологического и потребительского цикла (объединяя такие функции как распознавание, наблюдение, предсказание управление) и возможности их встраивания в единую концепцию морской интеллектуальной транспортной системы.

Таблица 1

Сравнение между предлагаемым методом и методом JPEG

Изображения	JPEG			Предложенный метод		
	С/Ш	СС	БСП	С/Ш	СС	БСП
Рис. 1а	34	32	0,32	37	33	0,12
Рис. 1б	35	38	0,23	39	41	0,13
Рис. 1в	33	35	0,31	36	45	0,11
Рис. 2а	36	36	0,51	41	43	0,21
Рис. 2б	35	36	0,33	38	45	0,21
Рис. 2в	37	38	0,28	42	48	0,11

Таблица 2

Сравнение производительности предлагаемого метода и метода JPEG

Изоб.	JPEG			Предложенный метод		
	P Кад./с	t (сек.)	W (о/с)	P Кад./с.	t (сек.)	W (о/с)
Рис. 1а	27	0,04	56	37	0,02	66
Рис. 1б	28	0,035	54	41	0,02	64
Рис. 1в	26	0,038	56	40	0,025	66
Рис. 2а	25	0,04	53	45	0,022	73
Рис. 2б	26	0,03	51	52	0,019	61
Рис. 2в	25	0,04	49	51	0,018	79

Литература

1. Zhu, C.; Zhou, H.; Wang, R.; Guo, J. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010, 48, 3446–3456.
2. Kretschmann, L.; Burmeister, H.-C.; Jahn, C. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier. Res. Transp. Bus. Manag. 2017, 25, 76–86.
3. S. Wells, P.F. Addison, P.A. Bueno, M. Costantini, A. Fontaine, L. Germain, T. Lefebvre, L. Morgan, F. Staub, B. Wang Using the IUCN Green List of Protected and Conserved Areas to promote conservation impact through marine protected areas Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst., 26 (S2) (2016), pp. 24-44.
4. E.T. Game, H.S. Grantham, A.J. Hobday, R.L. Pressey, A.T. Lombard, L.E. Beckley, K. Gjerde, R. Bustamante, H.P. Possingham, A.J. Richardson Pelagic protected areas: the missing dimension in ocean conservation Trends Ecol. Evol., 24 (7) (2009), pp. 360-369.
5. Kanjir, U.; Greidanus, H.; Oštir, K. Vessel detection and classification from spaceborne optical images: A literature survey. Remote Sens. Environ. 2018, 207, 1–26.
6. Фахми, Ш.С. Выделение контуров изображений морских судов// Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов Я.А., Калинина Е.С., Иванов А.В./ Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3 (45). Т.3. С.132–143.
7. С.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
8. G. J. Pottie and W. J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors," Communications of the ACM, vol. 43, no. 5, pp. 51–58, 2000.
9. Collotta, M.; Pau, G.; Talty, T.; Tonguz, O.K. Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT. IEEE Commun. Mag. 2018, 56, 125–131.
10. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. Digital Image Processing. Pearson Education, Englewood Cliffs, 2002.
11. Фахми Ш.С., Рыжов Н.Г., Хасан Я.А., Калинина Е.С. Адаптивный алгоритм кодирования и декодирования изображений в транспортных системах наблюдения// Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 8. С. 475-481.

12. Фахми, Ш.С.. Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения/ Е.В.Костикова, Ш.С. Фахми, Я.М.Хасан, С.А.Селиверстов, А.В.Соболев, Н.В.Подопригора// Морские интеллектуальные технологии. 2020 Т. 1. № 2 (48). С. 142–152.
13. Фахми, Ш.С. Гибридный метод преобразования изображений морских судов// Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов С.А., Хасан Я.А., Абдулджаббар Н.-Т.М., Иванов А.В./Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3 (45). Т.3. С.121–132.
14. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов/ М.С. Крюкова, Хасан Я.А., Ш.С. Фахми и др.// Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.

References

1. Zhu, C.; Zhou, H.; Wang, R.; Guo, J. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010, 48, 3446–3456.
2. Kretschmann, L.; Burmeister, H.-C.; Jahn, C. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier. *Res. Transp. Bus. Manag.* 2017, 25, 76–86.
3. S. Wells, P.F. Addison, P.A. Bueno, M. Costantini, A. Fontaine, L. Germain, T. Lefebvre, L. Morgan, F. Staub, B. Wang Using the IUCN Green List of Protected and Conserved Areas to promote conservation impact through marine protected areas *Aquat. Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 26 (S2) (2016), pp. 24-44.
4. E.T. Game, H.S. Grantham, A.J. Hobday, R.L. Pressey, A.T. Lombard, L.E. Beckley, K. Gjerde, R. Bustamante, H.P. Possingham, A.J. Richardson Pelagic protected areas: the missing dimension in ocean conservation *Trends Ecol. Evol.*, 24 (7) (2009), pp. 360-369.
5. Kanjir, U.; Greidanus, H.; Oštir, K. Vessel detection and classification from spaceborne optical images: A literature survey. *Remote Sens. Environ.* 2018, 207, 1-26.
6. Fahmi, Sh.S. Vydelenie konturov izobrazhenij morskikh sudov [Selection of contours of images of sea vessels]// Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Seliverstov Ya.A., Kalinina E.S., Ivanov A.V./ Marine intelligent technologies. 2019. No. 3 (45). Vol.3. pp.132-143.
7. C.-Y. Chong and S. P. Kumar "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges" *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, No. 8, pp. 1247-1256, 2003.
8. G. J. Pottie and W. J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors," *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 51–58, 2000.
9. Collotta, M.; Pau, G.; Talty, T.; Tonguz, O.K. Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 125–131.
10. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Pearson Education, Englewood Cliffs, 2002.
11. Fahmi Sh.S., Ryzhov N.G., Hasan Ya.A., Kalinina E.S. Adaptivnyj algoritm kodirovaniya i dekodirovaniya izobrazhenij v transportnyh sistemah nablyudeniya [Adaptive algorithm for encoding and decoding images in transport surveillance systems]// *Information Technologies*. 2019. Vol. 25. No. 8. pp. 475-481.
12. E.V. Kostikova, S.S. Fahmi, Ya.M. Hasan, S.A. Seliverstov, A.V.Sobolev, N.V.Podoprigora. Adaptivnoe spektral'noe kodirovanie izobrazhenij v sistemah videonablyudeniya [Adaptive spectral encoding of images in video surveillance systems]. *Marine intelligent technologies*. 2020 vol. 1 № 2 (48). P. 142-152.
13. Fahmy S., Shatalova N. In., Seliverstov A. C., Hassan, Y. A., Abdel Jabbar N.-T. M., Ivanov, A. V. Gibridnyj metod preobrazovaniya izobrazhenij morskikh sudov [Hybrid method of converting images ships]. *Marine intellectual technologies*. 2019. No. 3 (45). Vol.3. p.121-132.
14. Fahmi Sh.S, M.S. Kryukova, Hasan Ya.A., et al. Metody, algoritmy kodirovaniya i klassifikaciya izobrazhenij morskikh sudov [Methods, coding algorithms and classification of images of sea vessels]. *Marine intelligent technologies*. No. 1 (43). Vol.3. 2019. p.145-155.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

Святослав Александрович Селиверстов кандидат технических наук, старший научный сотрудник Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 Тел.: +7(812) 321-95-68 e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi, Associate Professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

Svyatoslav A. Seliverstov PhD in Engineering Science, Senior Researcher Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13 tel. : +7 (921) 321-95-68 e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Артём Алексеевич Халтурин, аспирант кафедры «Электроэнергетики и электромеханики» Санкт-Петербургского горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: artyomatwork247@mail.ru

Artyom Alekseevich Khalturin, PhD student of Electroenergetics and Electromechanics Department in Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, 21st line of Vasilevsky Island, 2 e-mail: artyomatwork247@mail.ru

Ершат Рашитович Шафхатов, аспирант кафедры «Электроэнергетики и электромеханики» Санкт-Петербургского горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: ershat11@mail.ru

Ershat Rashitovich Shafhatov, PhD student of Electroenergetics and Electromechanics Department in Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, 21st line of Vasilevsky Island, 2, e-mail: ershat11@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.043>

Алгоритмы семантической оперативной передачи морских изображений

Ш.С. Фахми^{1,2} shakeebf@mail.ru, Н.В. Шаталова¹ shatillen@mail.ru,
Е.В. Костикова³ kostikova.ev@mail.ru, О.В. Бородина¹ borodinaov@gmail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Беспилотные транспортные средства, дроны и автономные автомобили, получили широкое применение в повседневной жизни благодаря недавним достижениям в области робототехники и искусственного интеллекта. Наблюдение за акваториями и развитие технологий дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) привели к острой необходимости решения задачи обнаружения и слежения за морскими судами в целях обеспечения контроля и безопасности. В последнее время стратегии обучения, относящиеся к области машинного обучения, стали нишей, представляющей интерес для специалистов по ДЗЗ, в частности, серьезной проблемой является оперативная передача видеоинформации с целью повышения ситуационной осведомленности заинтересованных служб в обеспечении контроля и безопасности в реальном времени. При этом важнейшим требованием передачи морских сюжетов является сохранение семантики изображений – пространственные объекты и взаимосвязь между ними без перехода в спектральную область сигнала. В данной работе рассмотрены новые алгоритмы структуризации визуальных данных на основе выделения опорных точек объектов изображений. Развитие технологии систем на кристалле позволило перейти от теоретического моделирования к реализации быстрых пирамидально - рекурсивных алгоритмов обработки видеоинформации. Выполнено моделирование алгоритмов передачи и оценка показателей качества видеосистем передачи изображений.

Ключевые слова: семантическая передача, опорные точки, структуризация визуальных данных, триангуляция, аппроксимация.

Для цитирования: Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Алгоритмы семантической оперативной передачи морских изображений, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 201—207.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.043>

Algorithms of semantic operational transmission of marine images

Shakeeb S. Fahmi^{1,2} shakeebf@mail.ru, Natalia V. Shatalova¹ shatillen@mail.ru,
Elena V. Kostikova³ kostikova.ev@mail.ru, Olga V. Borodina¹ borodinaov@gmail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Unmanned vehicles, drones and autonomous cars have been widely used in everyday life thanks to recent advances in robotics and artificial intelligence. Monitoring of water areas and the development of remote sensing technologies have led to an urgent need to solve the problem of detecting and tracking ships in order to ensure control and safety. Recently, learning strategies related to the field of machine learning have become a niche of interest for remote sensing specialists, in particular, the rapid transmission of video information in order to increase situational awareness of interested services in ensuring control and security in real time is a serious problem. At the same time, the most important requirement for the transmission of marine scenes is to preserve the semantics of images – spatial objects and the relationship between them without switching to the spectral region of the signal. In this paper, new algorithms for structuring visual data based on the selection of key points of image objects are considered. The development of system-on-a-chip technology made it possible to move from theoretical modeling to the implementation of fast pyramidal-recursive algorithms for processing video information. Modeling of transmission algorithms and evaluation of quality indicators of video image transmission systems are performed.

Keywords: approximation, security, visualization, saccades, semantic, structuring, triangulation.

Keywords: Semantic transmission, reference points, structuring of visual data, triangulation, approximation.

For citation: Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina Algorithms of semantic operational transmission of marine images, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 201—207.

Введение

Появились новые технологии глубокого обучения в результате достижения успехов в области цифровых технологий и доступности данных.

Глубокое обучение продемонстрировало способность и эффективность в решении сложных учебных задач, которые ранее были неразрешимыми, в частности сверточные нейронные сети, эффективны в приложениях обнаружения и

распознавания изображений. Однако, с точки зрения аппаратной реализации и размещения всей системы обнаружения и распознавания на одном кристалле, данные технологии обучение имеют огромный недостаток и решение задач передачи и анализа космических снимков морской среды, на основе субмикронных технологий, становятся практически не реализуемыми в условиях возрастания требований к быстродействию анализа в реальном времени.

Огромные объемы видеoinформации, полученные в результате ДЗЗ и необходимости оперативной передачи и анализа их в реальном времени, привели к поиску эффективных методов обработки изображений с возможностью использования современных технологии размещения систем на одном кристалле.

Важно отметить, что любые методы и подходы в разработке видеoinформации, для дальнейшего развития и внедрения при постоянном уменьшении размеров кристалла и возрастания стоимости вентиля должны владеть следующими принципиальными свойствами:

1) обеспечение уменьшения битовой скорости передачи сжатых визуальных данных с учетом ограничений канала связи;

2) сохранение семантики изображений путём структуризации визуальных данных для последующей обработки и анализа.

С учетом выше сказанного в данной работе рассмотрены новые подходы оперативной передачи видеoinформации на основе эффективных алгоритмов выделения опорных точек (ОТ) объектов на морских изображениях и сохранения их в виде структурированного динамического массива (СДМ), позволяющего на последующих этапах решить задачи обнаружения и распознавания в реальном времени.

В работе решается задача структуризации и передачи космических снимков морской специфики на основе разработанного авторами метода сжатия и восстановления по ОТ [3,4].

Описание метода семантической передачи космических снимков

Предложенный авторами метод передачи видеoinформации ДЗЗ по ОТ включает следующие основные процедуры:

П.1) исходное космическое изображение рекурсивным способом разбивается на различные блоки с разными размерами и формами в зависимости от заданного порога отклонения яркостей пикселей в пределах текущего блока;

П.2) в каждом полученном блоке проверяется степень корреляции и контраста яркостей пикселей по заданному порогу для последующего деления;

П.3) структуризация и построение неравномерной сетки изображения и переход в п. 2;

П.4) нахождение ОТ в каждом блоке неравномерной регулярной сетки;

П.5) формирование СДМ ОТ для передачи по каналу связи.

В ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук разработаны различные алгоритмы для реализации метода передачи видеoinформации по ОТ, а также выполнена систематизация всех возможных

вариантов алгоритмов разбиения и поиска ОТ, что позволяет четко определить преимущества и недостатки каждого алгоритма и область эффективного применения того или иного алгоритма.

Наиболее важной научной новизной с точки зрения зрения искусственного интеллекта является раскрытие механизма человеческого зрения и принципа организации саккадических движений глаза, в результате которых в мозг передается видеoinформация в виде ОТ [5, 6], содержащая семантику передаваемой сцены [6].

Средоточение глаза на объекте называется фиксацией. Фиксация обычно длится около 300 мс. После фиксации глаз совершает движение, называемое "саккадой", чтобы зафиксироваться на другой части того же объекта или на новом объекте. Такие саккады представляют собой высокоскоростные баллистические движения, которые длятся примерно 150-200 мс от планирования до исполнения [6]. Во время движения саккады никакая информация не получается, так как восприятие подавляется, чтобы зритель не видел размытого изображения.

Движения глаз открывают уникальную возможность увидеть ненаблюдаемые перцептивные, когнитивные и оценочные процессы людей, занятых принятием решений. Они позволяют по-новому взглянуть на эти процессы, которые в противном случае получить нелегко, позволяют объяснить фундаментальные явления поиска и выбора и позволяют предсказывать будущие решения. Следовательно, центральным и важнейшим, с точки зрения авторов, являются способы нахождения ОТ, как результат фиксации глаза при обходе всей сцены.

Различают:

- семантическая сегментация сцены – это разделение исходного изображения на области, содержащие группу пикселей, принадлежащие одному объекту;

- описание сцены в терминах объектов и значений их свойств, а также пространственных отношений между ними;

- в описании изображений понятиям онтологии сопоставляются их экземпляры – объекты, связанные отношениями.

Из выше всех перечисленных понятий семантики изображения общими являются объекты изображения и их взаимосвязь, как оптическая, так и геометрическая – морфологическая свойства объектов.

Понятие объекта сцены связано с перепадами контраста, а перепады представляют собой границы объектов, где соседние пиксели имеют ярко выраженное отличие (в большинстве случаев). Контуры объектов на изображениях можно получить различными методами, которые изложены в работах [7,8].

В работе [8] используется способ, в котором, конструирование контекстно-значимых блоков выполняется путём нахождения равнояркостных и равноцветных областей изображения и присвоение им интегрированных по изображению характеристик за счет выбора переменных порогов отсечки.

Таким образом, семантика любого изображения и раскрытие смысла любой сцены заключается в оптических и геометрических особенностях ОТ и

взаимосвязей между ними, а поиск ОТ является, с точки зрения авторов, наиболее оптимальным способом эффективной передачи видеoinформации при сохранении семантики сцены.

Следует отметить, что все разработанные алгоритмы отличаются друг от друга только

процедурами 1 и 4 (способом разбиения и поиском ОТ). Способы разбиения могут быть разбиты на квадраты при делении блока на 4, на прямоугольники при делении на 2 и 3 блока (рис. 1).

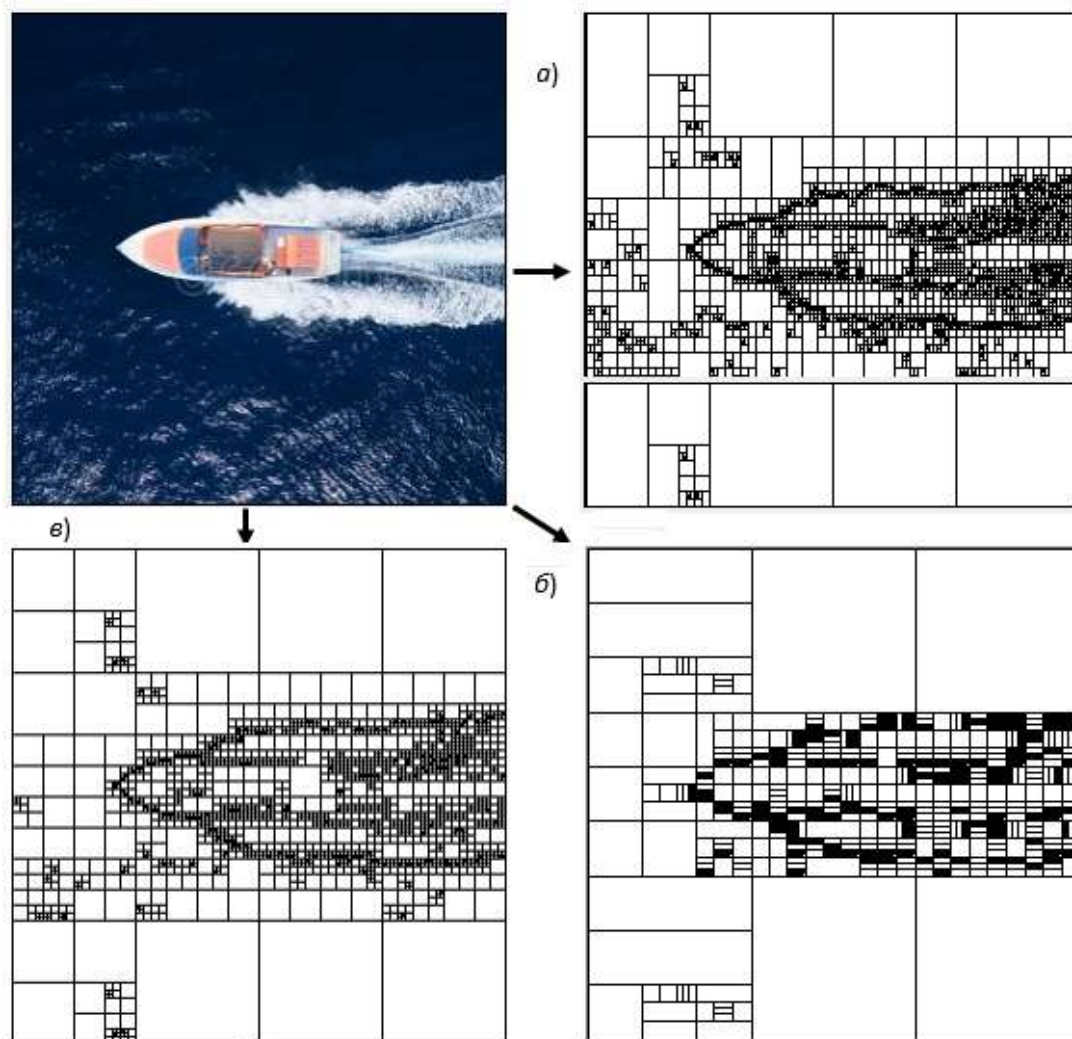


Рис. 1. Разбиение исходного изображение на блоки различной формы и размера при одном заданном пороге и формирование неравномерной сетки: а) деление на два блока, б) на три блока и в) на 4 блока

Рассмотрим каждую процедуру по отдельности.

Оценка корреляции и разбиение изображений

Различные варианты разбиения изображений при структуризации визуальных данных приводят к различным объемам вычислительных затрат при одном и том же заданном пороге разбиения. Из рис. 1 видно, что разбиение на три блока имеет наименьшую сложность, с точки зрения количества блока сетки. При этом вопросы, связанные с семантикой, сохраняются, т.к. границы объектов четко выделены и представляют собой блоки определенного минимального размера.

Известный коэффициент для оценки корреляции (например, коэффициент Пирсона) часто используется в статистическом анализе, распознавании образов и обработке изображений. Данная процедура включает сравнение яркостей двух строк в пределах блока по следующей формуле:

$$r_1 = \frac{\sum_i (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_{cp})^2 \cdot \sum_i (y_i - y_{cp})^2}},$$

где x_i – яркость (интенсивность) пикселя на строке 1, y_i – яркость пикселя на строке 2, x_{cp} – средняя интенсивность строки 1, а y_{cp} – средняя интенсивность строки 2. Далее выполняется попарное сравнение всех строк в пределах блока и вычисляется среднее корреляция по блоку:

$$r_{cp} = \frac{\sum r_k}{K},$$

где K – число попарно сравниваемых строк в пределах блока.

Важнейшим этапом построения когнитивных транспортных видеосистем (КТВС) для обнаружения и распознавания объектов на изображениях является структуризация визуальных данных.

Поразительные результаты, полученные с помощью структурированных моделей представления видеоинформации в задачах распознавания, заинтересовали сообщество разработчиков программного обеспечения при изучении их применения к задачам искусственного зрения. Среди их существенных преимуществ, структур данных (в нашей работе неравномерные сетки) позволяют моделировать длительные зависимости между элементами входной последовательности и поддерживают параллельную обработку видеопотока.

В отличие от сверточных сетей, структурированные данные требуют минимальных индуктивных смещений для своей конструкции и, естественно, подходят в качестве форматов управления пикселями изображений. Кроме того, простая конструкция сетки позволяет обрабатывать изображения и видео с использованием неравномерных блоков и демонстрирует превосходную масштабируемость для сетей очень большой емкости и огромных наборов данных. Эти сильные стороны привели к впечатляющему прогрессу в решении ряда задач видения с использованием структур данных в виде сеток. Однако, как было отмечено, вычислительная

сложность (число блоков) сильно отличаются в зависимости от способа разбиения исходного изображения, следовательно, возникает необходимость оценки сложности алгоритмов (W_{KB}) формирования неравномерной сетки и определение оптимального разбиения для конкретных классов морских сюжетов.

Поиск опорных точек объектов на изображении

Как было отмечено ранее, в мозг человека передаются ОТ, максимально характеризующие свойства и формы объекта. Для нахождения ОТ на изображениях, в ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук были разработаны множество алгоритмов, основанных на пирамидально-рекурсивном методе [9,10] разбиения изображения на блоки для поиска в каждом блоке ОТ, являющихся оптимальными с точки зрения минимального среднеквадратического отклонения при восстановлении результирующих изображений.

А способы нахождения ОТ могут быть: а) с произвольными ОТ в пределах блока (рис. 2а) и б) с фиксированным расположением в пределах блока (рис. 2 б).

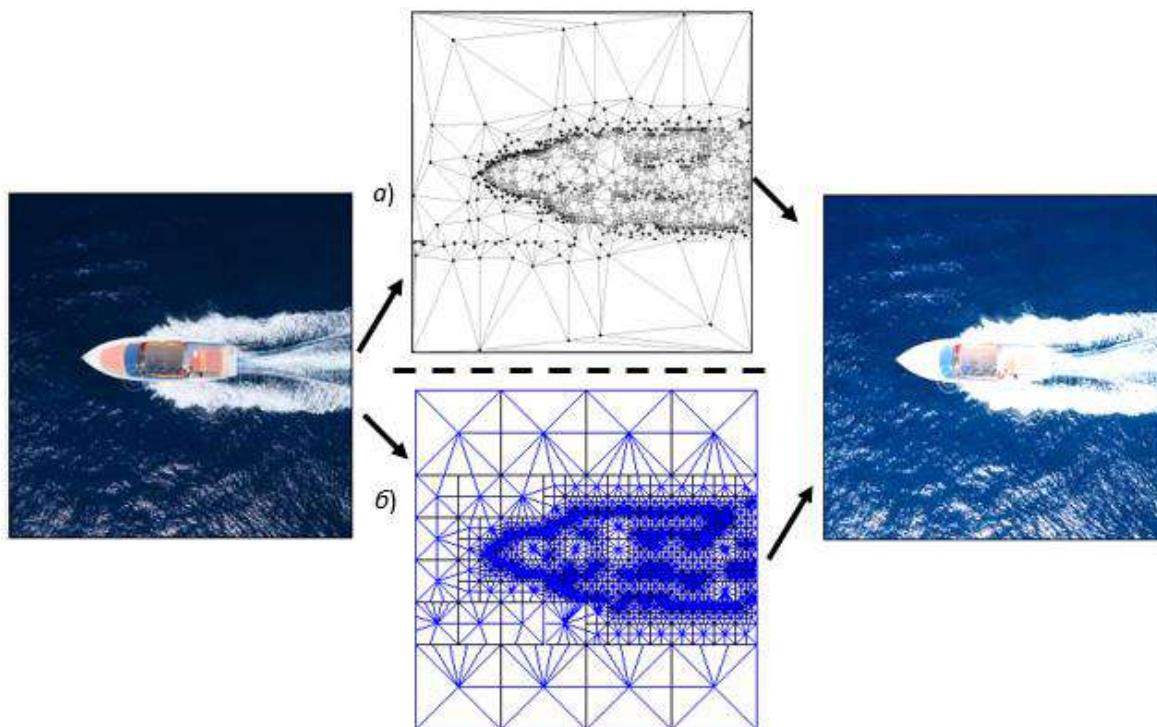


Рис. 2. Передача видеоинформации по ОТ: а) с произвольным расположением в пределах блока, б) с фиксированным расположением ОТ в пределах блока

Рассмотрим два алгоритма нахождения ОТ в пределах блока с произвольным (алгоритм 1) и фиксированным расположением (алгоритм 2).

Алгоритм 1.

- 1) инициализация СДМ ОТ;
- 2) выделение контуров объектов;
- 3) аппроксимация функции контуров с заданным шагом приращения;
- 4) фиксация ОТ и запись в СДМ.

Алгоритм 2.

- 1) инициализация СДМ ОТ;

- 2) выбор ОТ из следующих возможных вариантов: центр блока, угловые точки каждого блока, минимумы или максимумы по гистограмме распределения частот яркостей пикселей в пределах блока;
- 3) фиксация ОТ и запись в СДМ.

Алгоритм семантической передачи морских изображений при ДЗЗ включает следующие основные этапы:

На передающей стороне КТВС.

- 1) приём видеопотока морских сюжетов;

2) формирование последовательности изображений;

3) задание порогов и параметров КТВС;

4) разбиение изображения на блоки и формирование неравномерной сетки;

5) нахождение ОТ и формирование СДМ;

6) передачи битового потока СДМ по каналу связи.

На приемной стороне КТВС.

1) прием битового потока СДМ;

2) триангуляция Делоне для ОТ произвольного расположения в пределах блока и рекурсивная триангуляция для ОТ с фиксированным расположением;

3) аппроксимация полученных триангуляционных решеток по яркости и восстановление результирующих изображений.

Главные достоинства триангуляции Делоне [10] на этапе восстановления морских сюжетов заключаются в следующем (рис. 1 в, г):

- естественным образом подстраивается под данные – там, где ОТ разрежены, треугольники – крупнее, а там, где есть сгущение – мельче (Рис. 2);

- количество треугольников не превышает удвоенного числа ОТ для случая триангуляции Делоне;

Развитие технологии систем на кристалле позволило перейти от теоретического моделирования к реализации быстрых пирамидально - рекурсивных алгоритмов обработки видеoinформации.

Результаты моделирования алгоритмов передачи морских сюжетов

Моделирование алгоритмов структуризации и передачи морских сюжетов было реализовано в среде *Microsoft Visual Studio C/C++* с использованием элементов объектно-ориентированного программирования и библиотеки *OpenCV*.

В качестве исходных данных были взяты снимки наблюдения от камер ДЗЗ, расположенных на различных высотах и имеющие форматы RGB: 256×256 и 1024×1024 (рис. 3).



Рис. 3. Классы изображений различной высоты

Для оценки эффективности алгоритмов передачи изображений ДЗЗ необходимо вычислить следующие количественные показатели качества видеосистем передачи ОТ изображений, позволяющих выбрать подходящие параметры КТВС:

Q_1 – вычислительная сложность алгоритмов передачи и приема видеoinформации (число операций/пиксель);

Q_2 – количество блоков в результате разбиения исходного изображения;

Q_3 – количество ОТ;

Q_{i4} – время обработки кадров (мс.).

Типы разбиения: Sp_1 – разбиение изображение на 4 квадрата; Sp_2 – разбиение изображение на два прямоугольника; Sp_3 – разбиение изображения на три прямоугольника.

Таблица

Количественные показатели видеосистем передачи морских сюжетов

Тип разбиения	Алгоритм № 1 (256×256)			
	Q_{i1}	Q_{i2+}	Q_{i3}	Q_{i4}
Sp_1	54	51×10^3	4×10^3	123
Sp_2	38	16×10^3	5×10^3	165
Sp_3	41	37×10^3	6×10^3	143
Алгоритм № 2 (256×256)				
	Q_{i1}	Q_{i2}	Q_{i3}	Q_{i4}
Sp_1	57	51×10^3	5×10^3	154
Sp_2	39	16×10^3	4×10^3	122
Sp_3	40	37×10^3	7×10^3	134

Следует отметить, что все показатели получены при одинаковом коэффициенте сжатия ($K_{сж}=50$) и среднеквадратическом отклонении ($СКО=10-15$), а субъективная оценка качества по пяти бальной шкале – “хорошо”. В таблицу занесены средние значения при обработке снимков различных

форматов и размера двумя выше указанными алгоритмами.

Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что построение неравномерных сеток при семантической передаче и восстановлении результирующих морских сюжетов позволяет эффективно определить параметры видеосистем с минимальными вычислительными затратами и, благодаря возможности управления вводом пороговых значений яркостей, можно достичь уменьшение битовой скорости передачи с учетом пропускной способности канала связи.

2. Эксперименты подтвердили, что предложенные алгоритмы обнаружения на основе неравномерных динамических решёток могут быть использованы для последующего анализа видеоинформации в задачах обнаружения и распознавания морских объектов в реальном масштабе времени при сохранении высокого качества результирующих изображений.

3. Разработанные алгоритмы с использованием рекурсивных процедур деления и структуризации изображения могут быть реализованы как аппаратно, так и программно с использованием параллельных многопроцессорных видеосистем на кристалле, которые могут быть использованы в беспилотных аппаратах при наблюдении за морской средой.

Литература

1. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки. Ред. Юсупов Р.М., Попович В.В. - СПб: Наука, 2013. 284 с.
2. Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Гальяно Ф.Р. Методы анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 145–153.
3. Иванов А.В., Фахми Ш.С. Обработка видеоинформации в транспортных видеосистемах реального времени: Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. – 222 с.
4. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Пышкина Н.Ю., Васильев Ю.И. Эффективность пространственно-рекурсивных алгоритмов передачи изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1 (54). С. 134-141.
5. Фахми Ш.С., Железнов М.М., Турусов С.Н. Метод и алгоритмы триангуляционного кодирования и декодирования изображений морских сюжетов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (36). Т.2. С.91–100.
6. Mannan, S., Ruddock, K. and Wooding, D. (1995) Automatic control of saccadic eye movements made in visual inspection of briefly presented 2-D images. *Spatial Vision*, 9(3), pp. 363-386.
7. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Крюкова М.С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений // Морские интеллектуальные технологии. № 2 (44). Т.2. 2019. С.129–137.
8. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: методы и технологии проектирования. Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 346 с.
9. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородин О.В. Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 1 (55). С. 133-140.
10. Фахми Ш.С. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений / Фахми Ш.С., Еид М.М., Бобровский А.И., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И., Альмахрук М., Салем А. // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 3. С. 15-20.

References

1. Intellektual'nye geograficheskie informacionnye sistemy dlya monitoringa morskoy obstanovki [Intelligent geographic information systems for monitoring the marine environment]. Red. YUsupov R.M., Popovich V.V. - SPb: Nauka, 2013. 284 с. Ed. Yusupov R.M., Popovich V.V. St. Petersburg: Nauka, 2013. 284 p.

2. Laverov N.P., Popovich V.V., Vedeshin L.A., Gal'vano F.R. Metody analiza dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli [Methods of data analysis of remote sensing of the Earth] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. T. 12. № 6. S. 145–153.
3. Ivanov A.V., Fahmi SH.S. Obrabotka videoinformacii v transportnyh videosistemah real'nogo vremeni [Processing of video information in real-time transport video systems]: Monografiya. - SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya asociaciya vysshih uchebnyh zavedenij, 2021. – 222 s.
4. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kostikova E.V., Pyshkina N.YU., Vasil'ev YU.I. Effektivnost' prostranstvenno-rekursivnyh algoritmov peredachi izobrazhenij morskikh sudov [Efficiency of spatially recursive algorithms for transmitting images of marine vessels] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2021. № 4-1 (54). S. 134-141. // *Marine intelligent technologies*. No. 4 volume 1 2021. 2S. 139-147.
5. Fahmi SH.S., ZHeleznov M.M., Turusov S.N. Metod i algoritmy triangulyacionnogo kodirovaniya i dekodirovaniya izobrazhenij morskikh syuzhetov [Method and algorithms of triangulation encoding and decoding of images of marine subjects] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2019. № 4 (36). T.2. S.91-100.
6. Mannan, S., Ruddock, K. and Wooding, D. (1995) Automatic control of saccadic eye movements made in visual inspection of briefly presented 2-D images. *Spatial Vision*, 9(3), pp. 363-386.
7. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kryukova M.S. Vydelenie konturov morskikh ob"ektov na osnove piramidal'no-rekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenij [Selection of contours of marine objects based on the pyramidal-recursive method of image representation] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. № 2 (44). T.2. 2019. S.129-137.
8. Fahmi Sh.S., Kostikova E.V., Shatalova N.V. Transportnye videosistemy na kristalle: metody i tekhnologii proektirovaniya [On-Chip Transport Video Systems: Design Methods and Technologies]: Monograph. – St. Petersburg: Publishing and printing Association VUZ, 2020. S. 346.
9. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kostikova E.V., Borodina O.V. Issledovanie effektivnosti morskoy intellektual'noj videosistemy obrabotki podvodnyh izobrazhenij [Investigation of the effectiveness of the marine intelligent video system for processing underwater images] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2022. T. 1. № 1 (55). S. 133-140.
10. Fahmi SH.S. Sistematizaciya algoritmov nahozhdeniya i kodirovaniya opornyh toчек izobrazhenij [Systematization of algorithms for finding and encoding reference points of images] / Fahmi SH.S., Eid M.M., Bobrovskij A.I., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I., Al'mahruk M., Salem A. // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2017. № 3. S. 15-20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Факми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, 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

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Ольга Владимировна Бородина, 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

Shakeeb S. Fahmi, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Elena V. Kostikova, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.044>

Когнитивные транспортные видеосистемы: новый подход в сегментации изображений морских объектов

Н.В. Шаталова¹ shatillen@mail.ru, Ш.С. Фахми^{1,2} shakeebf@mail.ru,

Е.В. Костикова³ kostikova.ev@mail.ru, О.В. Бородина¹ borodinaov@gmail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Интеллектуализация транспорта и появление субмикронных технологий привели к широкому применению в повседневной жизни умных камер наблюдения и современных методов анализа видеoinформации. Такая тенденция привлекает все большее внимание со стороны морской отрасли, поскольку быстро развиваются беспилотные надводные транспортные средства. Беспилотные летательные аппараты могут выполнять различные задачи анализа, такие как обнаружение и распознавание морских объектов, на основе сегментации объектов на изображениях. В работе рассматривается новый метод сегментации морских изображений на основе многопорогового анализа гистограммы распределения яркостей пикселей исходного изображения в реальном времени. Предложенный метод является модифицированным вариантом и предполагает применение много порогового (вместо одного порога) анализа для формирования более продвинутой сегментации морских изображений. Таким образом, новая модель сегментации основана на алгоритме обработки амплитудной гистограммы распределения яркостей исходного изображения. Приведены результаты тестирования различных видеопотоков морской специфики, получены количественные оценки показателей эффективности для проектирования когнитивных транспортных видеосистем анализа: сложность алгоритмов, скорость обработки и средняя сложность вычислительных затрат.

Ключевые слова: сегментация, обнаружение, гистограмма распределения, многопороговый анализ, выделение объектов от фона.

Для цитирования: Шаталова Н.В., Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Бородина О.В. Когнитивные транспортные видеосистемы: новый подход в сегментации изображений морских объектов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 208—214.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.044>

Cognitive transport video systems: a new approach in segmentation of marine objects images

Natalia V. Shatalova¹ shatillen@mail.ru, Shakeeb S. Fahmi^{1,2} shakeebf@mail.ru,

Elena V. Kostikova³ kostikova.ev@mail.ru, Olga V. Borodina¹ borodinaov@gmail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation,

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The intellectualization of transport and the emergence of submicron technologies have led to the widespread use of smart surveillance cameras and modern methods of video information analysis in everyday life. This trend is attracting more and more attention from the marine industry, as unmanned surface vehicles are rapidly developing. Unmanned aerial vehicles can perform various analysis tasks, such as detection and recognition of marine objects, based on segmentation. The paper considers a new method of segmentation of marine images based on a multi-threshold analysis of the histogram of the pixel brightness distribution of the original image in real time. The proposed method is a modified application and involves the use of multi-threshold (instead of a single threshold) analysis to generate more advanced marine image segmentation. Thus, the new segmentation model allows algorithmic processing of the computational histogram of the original image brightness distribution. The results of testing various marine-specific video streams are presented, quantitative estimates of efficiency indicators for the design of cognitive transport video analysis systems are obtained: the complexity of algorithms, processing speed and average complexity of computational costs.

Keywords: segmentation, detection, distribution histogram, multi-threshold analysis, selection of objects from the background.

For citation: Natalia V. Shatalova, Shakeeb S. Fahmi, Elena V. Kostikova, Olga V. Borodina Cognitive transport video systems: a new approach in segmentation of marine objects images, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 208—214.

Введение

Беспилотные транспортные средства, дроны и автономные автомобили, получили широкое

применение в повседневной жизни благодаря недавним достижениям в области робототехники и искусственного интеллекта. Такая тенденция привлекает все большее внимание со стороны

морской отрасли, поскольку быстро развиваются беспилотные надводные транспортные средства. Беспилотные летательные аппараты могут выполнять различные задачи, такие как научные исследования, обнаружение и слежение за морскими объектами, сбор экологической информации, поисково-спасательные работы и связь, в различных сценариях [1,2]. Что еще более важно, беспилотные летательные аппараты обладают неотъемлемым преимуществом при исследовании опасных зон благодаря своей миниатюрной конструкции, которая может значительно снизить зависимость от оператора-человека и позволяет выполнять автономные длительные операции в суровых условиях морской среды. Однако из-за специфики и особенностей морской среды, а также сложности окружающей среды - влияние солнечных лучей (блики) и морской туман, разработка надежной когнитивной транспортной видеосистемы (КТВС) для обеспечения оперативной ситуационной осведомленности, остается сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

В данной статье предлагается новый метод сегментации, на основе много-порогового анализа гистограммы распределения частот пикселей, для точного восприятия различных морских сред. Данный подход представляет собой развитие известного метода под названием – метод порогового значения Отцу (Otsu method), соответствующий линейному дискриминантному критерию, который предполагает, что изображение состоит только из объекта (переднего плана) и фона, а неоднородность и разнородность фона игнорируются [3,4]. Метод Otsu устанавливает пороговое значение, чтобы попытаться свести к минимуму перекрытие распределений классов. Учитывая это обстоятельство, метод Otsu сегментирует изображение на две светлые и темные области T_0 и T_1 , где область T_0 представляет собой набор уровней интенсивности от 0 до t или в наборе обозначений $T_0 = \{0, 1, \dots, t\}$ и область $T_1 = \{t+1, \dots, l-1, l\}$, где t - пороговое значение, l_{max} - максимальный уровень серого изображения (например, 256). T_0 и T_1 могут быть назначены объекту и фону или наоборот (объект не обязательно всегда занимает область освещения). Однако такой подход приводит к формированию бинарного представления изображения с разделенными двум областями: объект и фон.

Предложенный метод является модифицированным вариантом и предполагает применение много порогового (вместо одного порога) анализа для формирования более продвинутой сегментации морских изображений. Таким образом, новая модель сегментации основана на алгоритме обработки амплитудной гистограммы распределения яркостей исходного изображения. Она позволяет получать более точные результаты по фиксации контуров требуемых морских объектов (МО) и повышать точность обнаружения на водной поверхности.

Постановка задачи исследования

Одна из наиболее актуальных задач построения КТВС наблюдения и контроля морской среды – это задача обнаружения морских объектов (судов, катеров, кораблей и т.д.) и их классификация в

реальном времени, где в рамках данной задачи требуется определить, принадлежит ли некоторый объект на изображении к определенному классу (морской объект). При этом важнейшим является оценка информационных показателей производительности КТВС: Pl_1 – скорость обработки (сек.) и указана в интервале ($min - max$); Pl_2 – сложность алгоритма (количество операций/пиксел) и указана в интервале ($min - max$) и Pl_3 – средняя вычислительная сложность.

Под сегментацией понимается процесс преобразования исходного изображения в бинарное представление по оптическим или статистическим характеристикам с целью выделения требуемых объектов путем определения границ, а в качестве характеристик часто на практике используются: цвет, яркость, плотность распределения пикселей и т.д. Наиболее распространённым способом анализа видеoinформации является использование порогов для группировки и классификации пикселей.

Различают два типа сегментации: 1) семантическая сегментация - это процесс классификации каждого пикселя, принадлежащего определенной метке. Другими словами, при наличии отличающихся друг от друга (т.е. разных) экземпляров одного и того же объекта присваивают им одну и ту же метку. Например, если на изображении есть два корабля, то семантическая сегментация дает одинаковую метку всем пикселям обоих кораблей; 2) обычная сегментация объектов и отличается от семантической сегментации в том смысле, что она присваивает уникальную метку каждому объекту на изображении. Если три корабля, то всем 3 кораблям будут присвоены три разные метки (т.е. цвета). При семантической сегментации всем им был бы присвоен один и тот же цвет.

Проектирование КТВС для распознавания морских объектов должен содержать технику сегментации изображений. Отличные результаты сегментации могут напрямую повлиять на точность распознавания в процессе анализа изображений. Суть сегментации изображений заключается в группировке каждого кадра определенного класса изображения или видео на несколько конкретных групп объектов или областей и представлении их разными цветами для дальнейшего отделения от фона.

Описание метода сегментации морских изображений

Метод сегментации морских изображений путём анализа гистограммы распределения яркостей пикселей заключается в оптимальном выборе значений порогов в зависимости от глобальных минимумов (или максимумов). Такой выбор осуществляется на основе выравнивания гистограммы в интервалах между пиками. Далее после определения значений порогов требуется выполнить обратный переход от функции распределения яркостей к формированию однородных областей одновременно с осуществлением удаления помех и шумов.

Важно отметить, что при анализе гистограммы изображений минимум находится между двумя пиками и, следовательно, оптимальное значение порога необходимо найти именно с учетом количества и местоположения минимумов.

Эффективность предложенного метода возрастает при наличии следующих условия: 1) высокий уровень контраста между объектом и фоном; 2) полутоновое изображение с ярко выраженными максимумами (т.е. мод).

Если на гистограмме имеется один пик, то сегментация позволяет определить и выделить два сегмента - объект и фон, а если более одного (рис. 1), то в данном случае необходимо выполнить дополнительный анализ с учетом характеристик и свойств для точного разделения имеющихся объектов от фона (рис. 1).

Задача многоуровневого анализа для определения границ пиков на гистограмме связана с задачей кластеризации и эффективным вычислением значений порогов, определяющих границы областей.

В ИПТ РАН проводятся исследования по разработке алгоритмов итеративного объединения кластеров для формирования оптимальных дендрограмм путём выравнивания соседних значений пикселей по яркости, что позволяет удалить скачки частот яркости в пределах интервала каждого пика [3,4].

Однако основная проблема заключается в определении принадлежности пикселя тому или другому классу, на границах между пиками (рис. 1), следовательно, необходимо предварительно разработать алгоритм объединения пикселей и кластеризации по уровню серого полутоновых изображений.

Алгоритм обработки гистограммы заключается в следующих основных процедурах:

1) *Предварительная подготовка.* В начале каждому уровню яркости присваивается определенное значение кластера. При K уровнях яркостей существует K кластеров: C_1, C_2, \dots, C_K , следовательно, каждый кадр видеопотока включает T_k уровней яркостей, которые соответствуют C_k кластерам, и удовлетворяют условию: $T_1 < T_2 < \dots < T_K$.

Вычисление расстояния между двумя распределениями A и B , можно определить, как функцию $f_d(AB)$ на гистограмме и часто на практике применяется дискриминантный анализ для решения данной задачи [5]. Важно отметить, что чем меньше расстояние между пикселями, тем лучше их объединить.

2) *Слияние яркостей пикселей по гистограмме.* Для работы алгоритма, необходимо установить начальные значения для интервала яркостей исходного полутонового изображения $1 \leq k \leq K$ следующим образом:

а) $P_n = P_r(C_n)$ – вероятность класса n . При этом известно, что

$$\sum_{k=1}^K P_k = 1$$

б) $P_r(z/C_n)$ – функция плотности вероятности уровня серого z в классе n . Значение интенсивности пикселей z находится в диапазоне $[0, L-1]$.

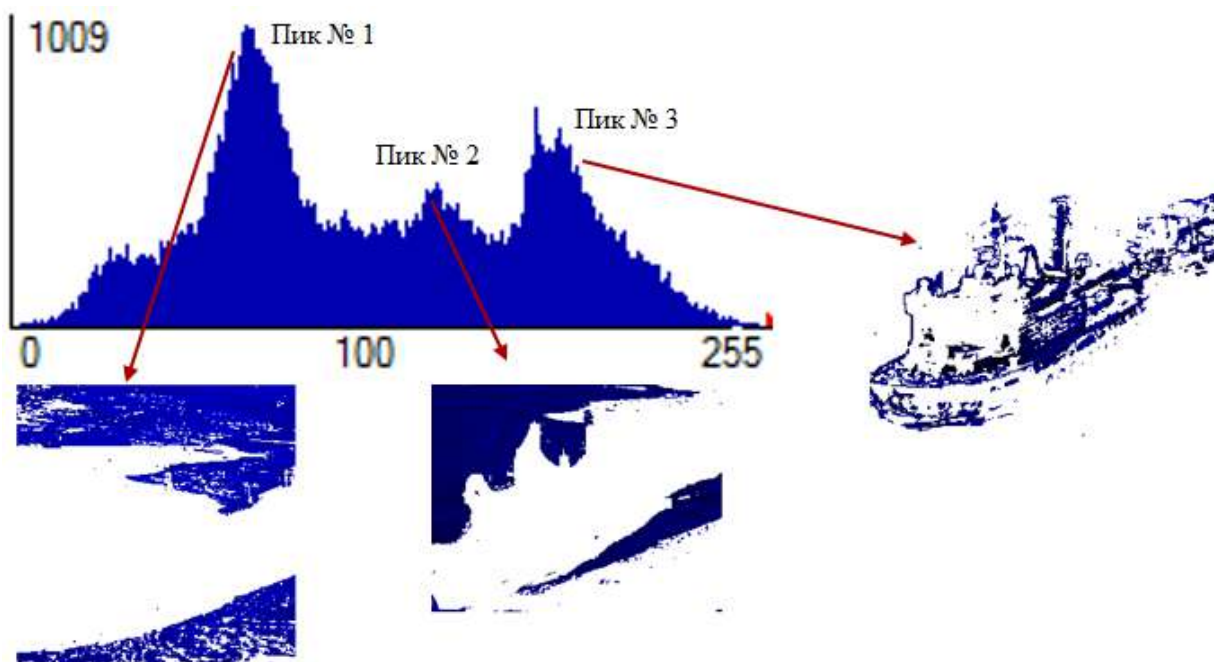


Рис. 1. Гистограмма изображения и области объектов в зависимости от пиков

3) *Пороговая обработка.* Данная обработка включает следующие основные этапы:

а) Определение средней величины кластера k , $m_k = T_k$, где m_k – номер шага k -го кластера, $P_k = h(T_k)$, где $h(z)$ – функция плотности распределения вероятности z ,

б) Определение расстояние между кластерами k_1 и k_2 по формуле:

$$Dist_{k_1, k_2} = \frac{P_{k_1} P_{k_2} [m_{k_1} - m_{k_2}]^2}{\sigma_{k_1, k_2}^2}$$

где σ_{k_1, k_2}^2 – общая дисперсия величин k_1 и k_2 , если они объединены.

$$M_{k_1 k_2} = \frac{P_{k_1} m_{k_1} + P_{k_2} m_{k_2}}{P_{k_1} + P_{k_2}},$$

$$m_k = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} z P_r(z/C_k) = \frac{1}{P_k} \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} zh(z)$$

$$P_k = P_r(C_k) = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} h(z)$$

$$\sigma_{k_1 k_2}^2 = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} [z - M_{k_1 k_2}]^2 h(z)$$

где $M_{k_1 k_2}$ – средняя величина кластеров k_1 и k_2 .

в) Поиск похожих кластеров k_i и k_j , где $i < j$, выбор наименьшего значения определенного расстояния. Далее выполняется слияние кластеров k_i и k_j , в кластер k_i и назначаются T_j с $T_j + 1$ для любого $j > i$. В итоге получим два кластера с пороговым значением T_i .

г) Повторить пункты 2 и 3 $K-2$ раз.

4) *Выполнение дисперсионного анализа для группировки яркостей.* Данный этап анализа гистограммы на основе дисперсионного анализа хорошо известен в математической статистике и подробно рассмотрен в работах авторов [6,7].

Предложенный метод много порогового анализа сканирует все возможные значения пороговых значений и вычисляет минимальные значения для уровней пикселей с каждой стороны порогового значения для того, чтобы найти пороговые значения с минимальной энтропией для суммы переднего плана - объекта и фона.

Важно, что оптимальное пороговое значение вычисляется путем минимизации суммы взвешенных групповых отклонений, где веса представляют собой вероятность существования соответствующих групп.

Результаты сегментации изображений морских объектов

В этом разделе представлены результаты, полученные для предложенного метода много порогового анализа морских изображений. Для проверки работоспособности разработанного метода были использованы свыше 400 морских изображений из "Стандартных" тестовых изображений (набор изображений, часто встречающихся в литературе) [8].

Оценки задачи выделения морских объектов от фона выполнены качественно, основываясь на субъективной оценке. Результаты показывают, что предложенный метод правильно классифицировал пиксели на области, принадлежащие морскому объекту и отделения его от фона для более чем 87% изображений, в то время как известный метод Отцу на 76% точно определил области морских объектов.

Для оценки эффективности предложенного метода сегментации применяем изображения морских объектов 4-х классов (рис. 2, а – г): а) из дрона наблюдения реки; б) в Арктике; в) на классическом фоне береговой линии и г) МО из беспилотника на фоне моря. Разработка и тестирования программ моделирования алгоритмов

проводились на языке C++ среды Visual C++ для Visual Studio 2019.

В результате тестирования были получены следующие количественные оценки (таблица):

- f_1 – число изображений, подвергавшихся обработке;
- f_2 – скорость обработки (сек) и указана в интервале ($min - max$);
- f_3 – сложность алгоритма (операции/пиксел) и указана в интервале ($min - max$);
- f_4 – средняя вычислительная сложность.

Таблица

Результаты моделирования и оценка алгоритмов сегментации

Видеопотоки, полученные от различных камер наблюдения	Количественные оценки алгоритмов сегментации Изображений морских судов			
	f_1	f_2	f_3	f_4
а) морские объекты со спутника ДЗЗ	230	$(13-36) \cdot 10^{-3}$	23 – 34	34
б) морские объекты в Арктике	190	$(5-16) \cdot 10^{-3}$	25– 45	41
г) морские объекты от камеры дрона	221	$(23-43) \cdot 10^{-3}$	22 – 32	38
в) морские объекты с беспилотника	318	$(65-89) \cdot 10^{-3}$	16 – 25	45

Из этих экспериментальных результатов можно заключить, что предлагаемый метод выделения границ морских объектов обеспечивает лучшую производительность, то есть переход к обработке видеoinформации возможен там, где требуется не менее 25 кадров в секунду (в среднем предлагаемый метод обеспечивает ~ 35).

В данной работе также выполнены сравнительные оценки предложенного метода с известными методами порогового значения Отцу и Гаусса. Нужно отметить, что метод Отцу пытается находить наилучшее пороговое значение, минимизируя дисперсию внутри группы пикселей, представляющие определенные классы, в то время как Гауссовский вариант пытается найти наилучшее пороговое значение, максимизируя дисперсию между группами. Оба метода были протестированы в ИПТ РАН на выше указанных изображениях.

Результаты показывают, что метод Гаусса значительно лучше работает на изображениях с двумя режимами в их гистограмме, а в остальном оба метода находят одно и то же пороговое значение и одинаково работают при классификации изображений с несколькими моделями, при этом предложенный метод показал на 20-30% лучше обоих при использовании много порогового анализа.

Заключение

Обнаружение и распознавание морских объектов считаются одной из серьезных проблем для проектирования и синтеза когнитивных транспортных видеосистем наблюдения. Поэтому, чтобы создать теоретическую и техническую базы для разработки эффективных видеосистем, заинтересованность в инвестировании и продвижении НИОКР постоянно

растет. В данной работе проведены исследования по отделению объектов от фона и качественному выделению границ морских судов, полученных из различных источников видеонаблюдения.

Разработанное программное обеспечение и математический аппарат оптимального определения порога серого уровня полутоновых

мультимодальных изображений с использованием дисперсионного анализа, на основе сходства уровней серого позволяют выделить границы морских объектов в сложных условиях шума и помех многоуровневого порога, следовательно, избежать проблему выбора порога при локальных минимумах.

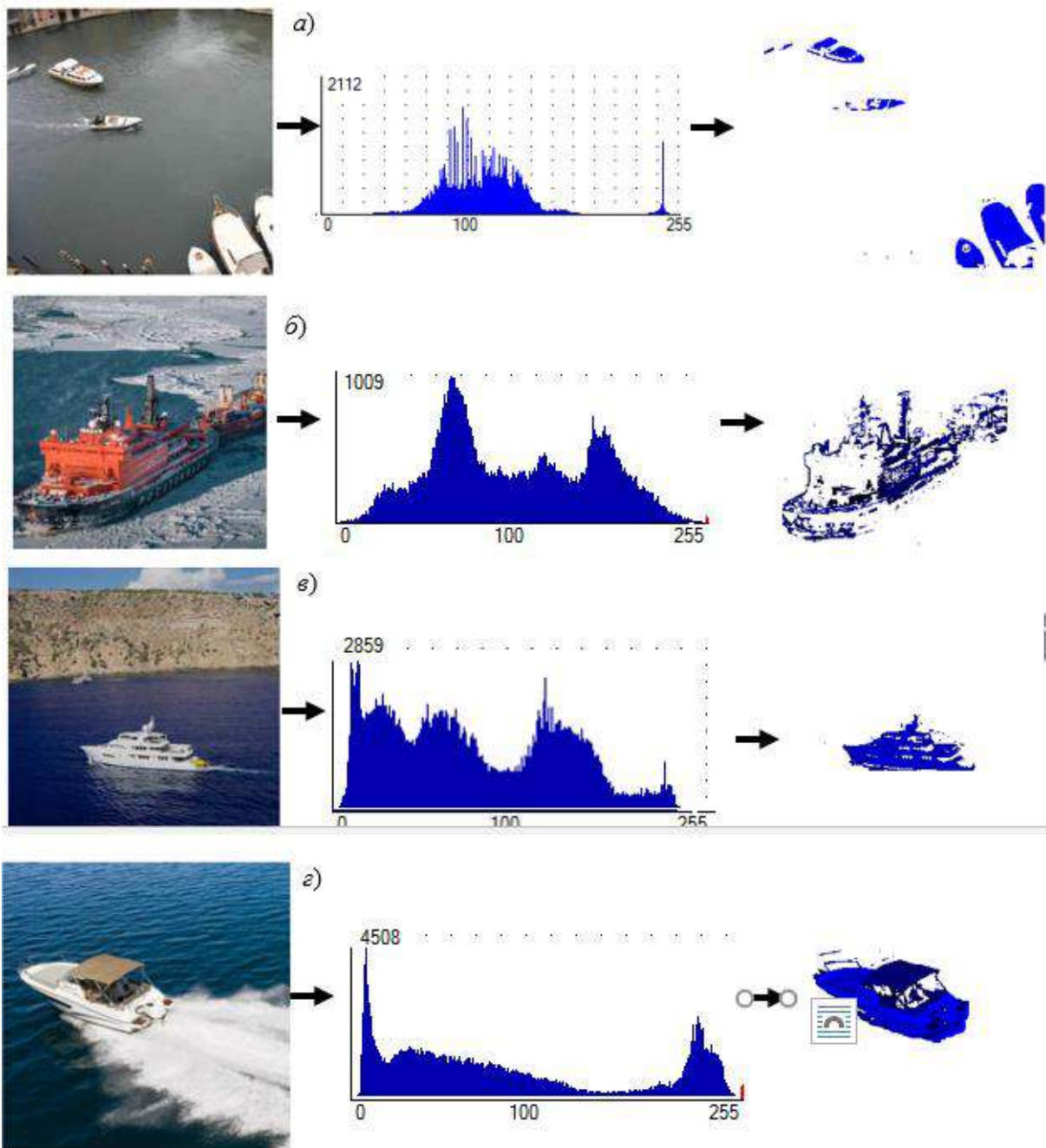


Рис. 2. Результаты построения гистограммы и сегментации: а) катера на реке, одномодальная гистограмма и сегментация, б) судно в Арктике, трёхмодальная гистограмма и сегментация, в) судно с классическим фоном, multimodal гистограмма и сегментация, г) Катер с кильватером, трёхмодальная гистограмма и сегментация

Важная особенность предложенного метода заключается в том, что использование дисперсионного анализа позволяет учесть различные зоны, которые заведомо не могут содержать признаков морского судна (горизонт,

береговая линия, блики и т. д.), и, следовательно, приводят к снижению вероятности ложной тревоги без уменьшения вероятности правильного обнаружения морских объектов. При этом исследования показали, что система обнаружения

судов в цветовых видеопоследовательностях эффективна, т.к. использует информацию, полученную как через цветовые, так и временные вариации для обнаружения огня в реальном времени.

Нужно отметить, что трехуровневый порог раскрывает больше информации об изображениях по сравнению с двухуровневым порогом сегментации. Таким образом, можно предположить,

что детализация изображений будет увеличиваться с увеличением числа и уровней порогов. В перспективе целесообразно рассмотреть некоторые другие усовершенствованные методы пороговой сегментации с целью достижения более высокого качества разделения объектов от фона при детализации и выявлении мелких объектов изображений.

Литература

1. Manley, J.E. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development; OCEANS 2008; IEEE: Quebec City, QC, Canada, 2008; pp. 1–4.
2. Xue, H.; Chen, X.; Zhang, R.; Wu, P.; Li, X.; Liu, Y. Deep Learning-Based Maritime Environment Segmentation for Unmanned Surface Vehicles Using Superpixel Algorithms. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1329. <https://doi.org/10.3390/jmse9121329>.
3. Крюкова М.С., Шидловский А.Л., Фахми Ш.С. Оценка показателей качества видеосистемы обнаружения лесных пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2018. № 2 (46). С. 63-73.
4. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Исследование эффективности морской интеллектуальной видеосистемы обработки подводных изображений // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. № 1 (55). С. 133-140.
5. Alayande, S. Ayinla Bashiru Kehinde Adekunle. An Overview and Application of Discriminant Analysis in Data Analysis. *Journal of Mathematics (IOSR-JM)* e-ISSN: 2278-5728, p-ISSN: 2319-765X. Volume 11, Issue 1 Ver. V (Jan - Feb. 2015), PP 12-15.
6. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Бородина О.В. Когнитивный алгоритм трехмерного дискретного косинусного преобразования морских сюжетов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2-1 (56). С. 185-192.
7. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Еид М.М. Метод и алгоритмы обнаружения и распознавания транспортных средств // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2019. Материалы международной-научно-практической конференции. © ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 2019. С. 229-236.
8. University of Southern California. Official site // URL: <https://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc&image=31#top> (дата обращения: 15.10.2022).

References

1. Manley, J.E. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development; OCEANS 2008; IEEE: Quebec City, QC, Canada, 2008; pp. 1-4.
2. Xue, H.; Chen, X.; Zhang, R.; Wu, P.; Li, X.; Liu, Y. Deep Learning-Based Maritime Environment Segmentation for Unmanned Surface Vehicles Using Superpixel Algorithms. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1329. <https://doi.org/10.3390/jmse9121329>.
3. Kryukova M.S., SHidlovskij A.L., Fahmi SH.S. Ocenka pokazatelej kachestva videosistemy obnaruzheniya lesnyh pozharov [Evaluation of the quality indicators of the video system for detecting forest fires] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2018. № 2 (46). S. 63-73.
4. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kostikova E.V., Borodina O.V. Issledovanie effektivnosti morskoy intellektual'noj videosistemy obrabotki podvodnyh izobrazhenij [Investigation of the effectiveness of the marine intelligent video system for processing underwater images] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. T. 1. № 1 (55). S. 133-140.
5. Alayande, S. Ayinla Bashiru Kehinde Adekunle. An Overview and Application of Discriminant Analysis in Data Analysis. *Journal of Mathematics (IOSR-JM)* e-ISSN: 2278-5728, p-ISSN: 2319-765X. Volume 11, Issue 1 Ver. V (Jan - Feb. 2015), PP 12-15.
6. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kostikova E.V., Borodina O.V. Kognitivnyj algoritm trekhmernogo kosinusnogo preobrazovaniya morskikh syuzhetov [A cognitive algorithm for three-dimensional discrete cosine transformation of marine images] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 2-1 (56). S. 185-192.
7. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Eid M.M. Metod i algoritmy obnaruzheniya i raspoznavaniya transportnyh sredstv [Method and algorithms for vehicle detection and recognition] // Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2019. Materialy mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy konferencii. © FGBUN Institut problem transporta im. N.S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk, 2019. pp. 229-236.
8. University of Southern California. Official site // URL: <https://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc&image=31#top> (дата обращения: 15.10.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53.

Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, 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

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Ольга Владимировна Бородина, 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

Shakeeb S. Fahmi, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation.

Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Elena V. Kostikova, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: borodinaov@gmail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.045>

Структура интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути

И.Г. Малыгин^{1,2} malygin_com@mail.ru, И.Н. Коновалов¹ info@iptran.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук;

²Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Аннотация. В статье предложена концепция разработки структуры и организации функционирования Интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) Северного морского пути (СМП) на примере такой ее части как Арктический интеллектуальный мультимодальный транспортный коридор (АИМТК). Представлены общая и детальные структурные схемы всей ИСЭБ, а также ее функциональных подсистем. Описана последовательность сбора экологических данных, а также общие принципы построения и функционирования ИСЭБ, как примера Интеллектуальной сети мониторинга и управления экологической безопасностью мультимодальной транспортной системы. Показана планируемая связь ИСЭБ с внешними системами экологического мониторинга РФ, ее взаимодействие с системами и органами контроля и надзора в области экологической безопасности РФ и возможное положение ИСЭБ в национальной мультимодальной транспортной системе. Рассматриваются современные технологии, использование которых целесообразно для организации ИСЭБ, к которым можно отнести такие как: актуальные способы получения значений экологических показателей и методы их обработки и анализа, гибкие методы организации системы связи элементов ИСЭБ и адаптивные способы организации систем хранения и передачи данных, обеспечивающих требуемую надежность и оперативность обработки данных, а также стабильность оказываемых системой сервисов.

Ключевые слова: экология, безопасность, транспорт, мультимодальная, система, управление, мониторинг, прогноз, моделирование, контроль.

Для цитирования: Малыгин И.Г., Коновалов И.Н. Структура интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 215—221.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.045>

The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route

Igor G. Malygin^{1,2} malygin_com@mail.ru, Ivan N. Konovalov¹ info@iptran.ru

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences; ²St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article proposes the concept of developing the structure and organization of the functioning of the Intelligent Environmental Safety System (ISES) of the Northern Sea Route (NSR), using the example of such a part of it as the Arctic Intelligent Multimodal Transport Corridor (AIMTK). The general and detailed structural diagrams of the entire ISES, as well as its functional subsystems, are presented. The sequence of collecting environmental data is described, as well as the general principles of construction and operation of the ISES, as an example of an intelligent network for monitoring and managing the environmental safety of a multimodal transport system. Modern technologies are considered, the use of which is expedient for the organization of ISES.

Keywords: ecology, safety, transport, multimodal, system, management, monitoring, forecast, modeling, control.

For citation: Malygin I.G., Konovalov I.N. The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. 2022. № 4 part 1, P. 215—221.

Введение

Применение различных интеллектуальных систем остается одним из актуальных направлений развития транспортной инфраструктуры, а системы безопасности безусловно составляют их важную часть, что подтверждено авторами исследований в статьях [1, 2].

В общем виде Интеллектуальная система экологической безопасности (ИСЭБ) (рис. 1) рассматривается как одна из функциональных подсистем Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы (ИМТС), на которую

возложены функции обеспечения экологической безопасности перевозок, а также мониторинга и управления экологической безопасностью всей мультимодальной транспортной системы. Эталонная модель ИМТС, ее место в сетевой архитектуре и факторы, определяющие актуальность ее создания подробно рассмотрены в работах [3, 4].

В тоже время ИСЭБ может выступать как самостоятельная система экологического мониторинга, анализа и прогнозирования (с учетом возможности расширения функционала системы за счет ее модульной структуры), и в этом случае целесообразно при построении системы применение

чрезвычайных ситуациях и катастрофах; сбор данных систем регистрации сейсмической активности и предупреждения о цунами. Полученные

данные используются для учета при прогнозировании и проводится анализ их влияния на экологическую ситуации территории АЗ РФ.

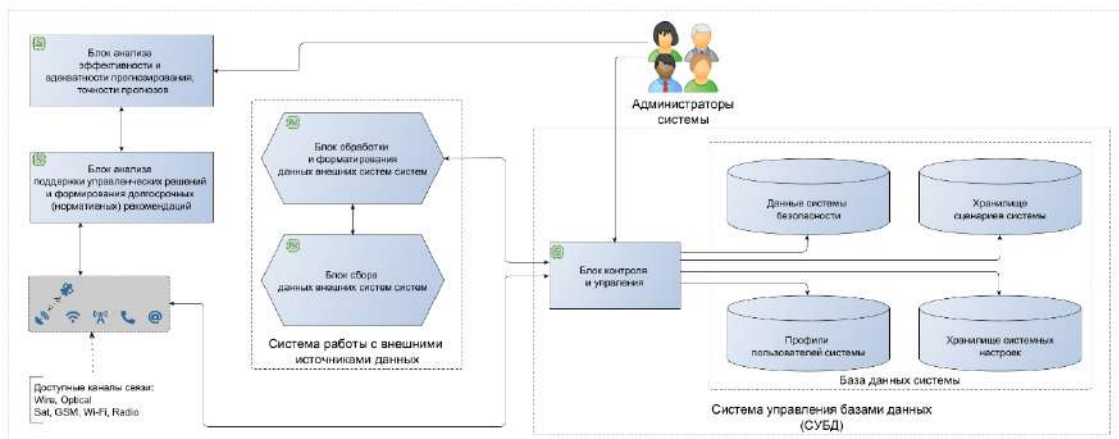


Рис. 2. Центр контроля и управления ИСЭБ

На ЦКУ также возложена функция по анализу подготовленных прогнозов на предмет их достоверности и адекватности.

Система анализа и прогнозирования основана на принципах виртуализации и является масштабируемой системой на базе облачных технологий условно объединенной в Центр обработки данных (ЦОД) ИСЭБ (рис. 3). В функции ЦОД входит развертывание и координация

взаимодействия нескольких видов виртуальных машин, а также размещение данных в масштабируемых системах хранения и организация доступа виртуальных машин к данным. Деятельность ЦОД осуществляется на арендуемых мощностях дата-центров.

С целью совершенствования мониторинга и прогнозирования возможно применение методик оценки данных, изложенные в статьях [13, 14].

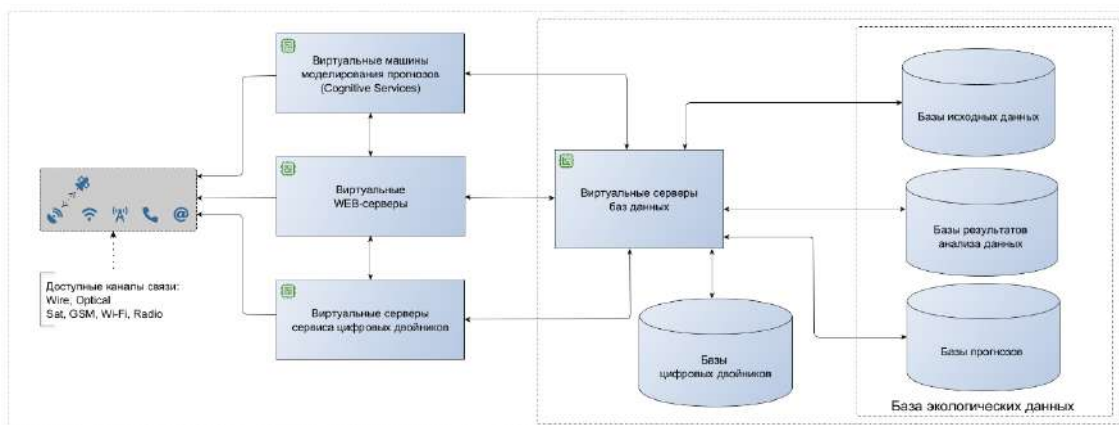


Рис. 3. Центр обработки данных ИСЭБ

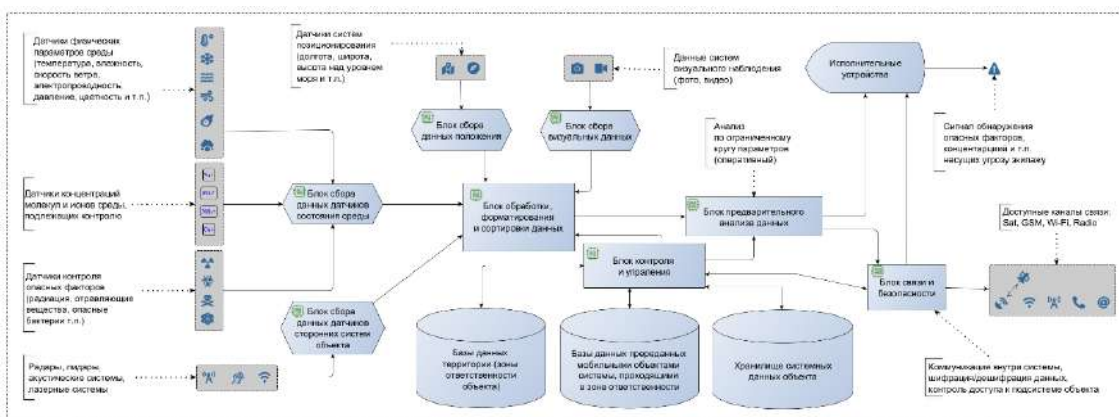


Рис. 4. Структурная схема элементов ИСЭБ на стационарном объекте

Предполагается дифференциация виртуальных машин по функциональному назначению на web-серверы, осуществляющих взаимодействие с пользователями ИСЭБ через сеть Internet, на машины сервиса цифровых двойников территорий, работающие с цифровыми двойниками (Real-time Territory Digital Twin) с хронологией изменений экологической ситуации и визуализацией прогнозов при известной динамике, и на машины

моделирования прогнозов, осуществляющие анализ данных и генерацию прогнозов развития ситуации на определенной территории и/или выявления глобального влияния локальных ситуаций на общее состояние экологической безопасности, а также выявление новых взаимосвязей и причинно-следственных цепочек (тенденций) негативных изменений экологической ситуации.

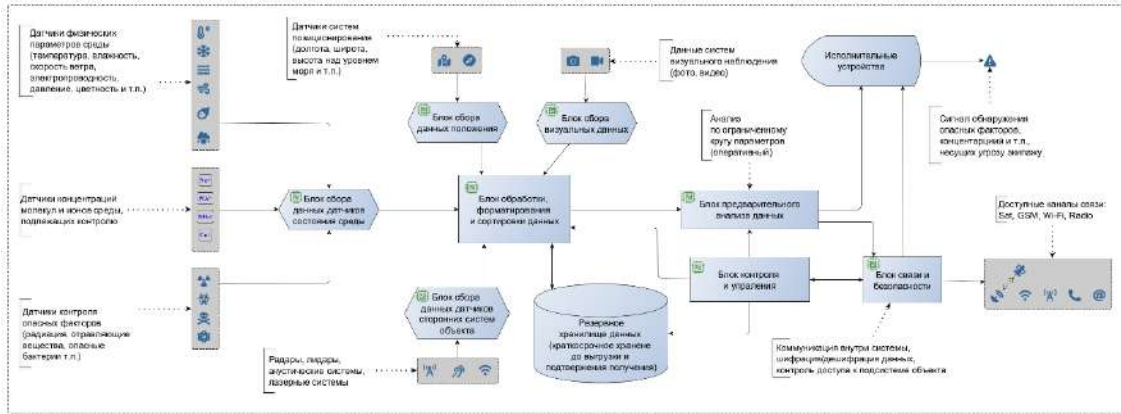


Рис. 5. Структурная схема элементов ИСЭБ на мобильном объекте

На первоначальном этапе осуществляется развертывание минимально необходимого расчетного количества виртуальных машин. В зависимости от прогнозируемой ЦКУ нагрузки на систему осуществляется развертывание или сворачивание дополнительных виртуальных машин требуемой направленности.

На основе прогнозирования может осуществляться выработка рекомендаций по компенсационным, ограничивающим и запрещающим мероприятиям, которые представляются региональным и/или федеральным органами исполнительной и законодательной власти осуществляющим деятельность в области экологической безопасности.

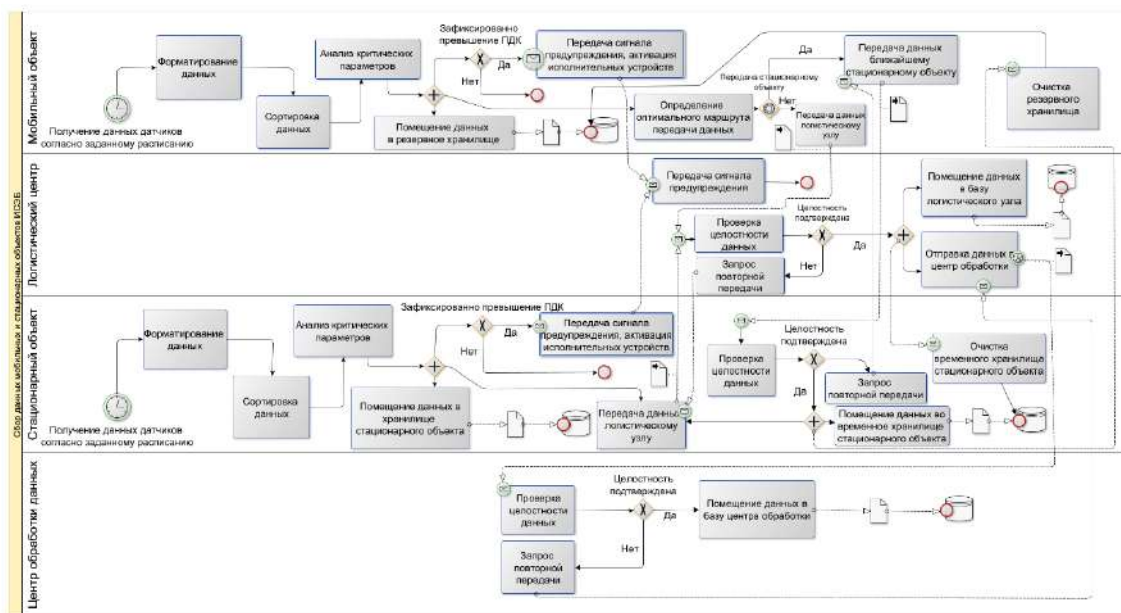


Рис. 6. Функциональная схема процесса сбора экологических данных мобильными и стационарными объектами.

Процесс сбора данных объектами системы мониторинга ИСЭБ (рис. 6) выглядит следующим образом: программно-аппаратный комплекс ИСЭБ мобильного или стационарного объекта по установленному расписанию запрашивает данные экологических датчиков объекта и снимает данные с

каналов сторонних устройств; блок обработки данных преобразует полученные данные в формат, выбранный в системе для обработки и хранения экологических данных, а также в случае мобильного объекта фиксирует геолокацию; обработанные данные помещаются во временное хранилище

объекта до подтверждения их передачи в СУБД и одновременно проводится оперативный анализ данных, по заранее выбранному количеству параметров, на предмет обнаружения угроз для персонала объекта; данные подготавливаются блоком связи и безопасности и передаются по иерархии системы мониторинга. Экологические данные поступают на хранение в базу данных логистического узла данной территории и параллельно в базу данных ЦОД, что позволяет снизить риск утраты или искажения данных.

Предобработка данных (сортировка, форматирование и т.п.) на мобильных и стационарных объектах системы позволит снизить нагрузку на вычислительные мощности ЦОД и СУБД (частично-распределенная обработка).

Заключение

Авторами разработаны общие принципы построения и функционирования ИСЭБ, как примера Интеллектуальной сети мониторинга и управления экологической безопасностью мультимодальной транспортной системы на примере АИМТК. Изложенная авторами концепция формирования структуры Интеллектуальной системы экологической безопасности предполагает применение современных технологий обмена, хранения и передачи информации для осуществления оперативного мониторинга экологической ситуации в районах пролегания Северного морского пути, осуществление прогнозирования экологических последствий штатной и/или нештатной (аварийной) эксплуатации мультимодального транспортного

коридора, аварийных и чрезвычайных ситуаций. Применение технологий виртуализации процессов позволяет перенести наиболее важные рабочие нагрузки на внешнюю инфраструктуру и повысить эксплуатационную эффективность, а также обеспечить безопасную удаленную работу и масштабируемый интерфейс. Также виртуализация позволяет повысить адаптивность системы к пиковым нагрузкам и сократить использование ресурсов во время снижения активности использования сервисов ИСЭБ. Внедрение современных облачных технологий при разворачивании и эксплуатации системы управления базами данных в ЦКУ ИСЭБ предоставляет гибкие возможности для миграции, модернизации, использовании баз данных и обеспечивает требуемый уровень надежности при работе с критически важными экологическими данными. Развертывание высококачественных прогностических интеллектуальных моделей экологической безопасности территории в виде API-интерфейсов (Application Programming Interface) делают возможным различные варианты их использования и обеспечивают их доступность широкому кругу пользователей. Развертывание системы предполагается осуществлять на базе имеющейся инфо-телекоммуникационной инфраструктуры связи с добавлением необходимых программно-аппаратных блоков сбора данных. Изложенная концепция позволяет как масштабирование ИСЭБ в рамках национальной мультимодальной транспортной системы, так и развитие системы на смежные отрасли, требующие мониторинга состояния экологической безопасности.

Литература

1. Малыгин И. Г., Сильников М. В. Интеллектуальные системы транспортной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2014. – № 1(29). – С. 1-13.
2. Малыгин И. Г. Интеллектуальные системы транспортной безопасности и пути внедрения их в мегаполисах // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2014: Материалы международной научно-практической конференции / Санкт-Петербург, 01–02 октября 2014 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2014. – С. 56-63.
3. Асаул А. Н., Малыгин И. Г., Комашинский В. И. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос. – 2016. – № 3. – С. 8-17.
4. Малыгин И. Г., Комашинский В. И. Особенности построения и архитектура перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортно-логистической системы // Технологии построения когнитивных транспортных систем: Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Санкт-Петербург, 14 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. – С. 7-14.
5. Иванов А. Ю., Малыгин И. Г. Метод и алгоритмы обеспечения целостности мобильных распределенных баз данных // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2008. – № 4(8). – С. 183-190.
6. Малыгин И. Г., Козьмовский Д. В. Методы обеспечения безопасности распределенных информационных систем МЧС России, основанных на анализе трафика и контроле сетевой деятельности пользователей // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 2(26). – С. 78-82.
7. Malygin I. G., Kuznetsova E. Yu. Proposals for the development of an intelligent system for managing the environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. - 2022. - V. 1. - No. 1 (55). – pp. 121-127.
8. Малыгин И. Г., Гавкалюк Б. В., Кузнецова Е. Ю. Интеллектуальная система экологической безопасности – основа арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2021: Материалы Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 8-12.
9. Катцын Д. В., Малыгин И. Г. Автоматизированная система комплексного мониторинга за состоянием безопасности объектов ОАО РЖД // Транспорт России проблемы и перспективы - 2010: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции / Санкт-Петербург, 01–02 ноября 2010 года. – Санкт-Петербург: Ю-Питер, 2010. – С. 114-118.
10. Малыгин И. Г., Комашинский В. И., Катцын Д. В. Некоторые проблемы построения когнитивных транспортных систем и сетей // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015: Материалы Юбилейной

Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2015 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2015. – С. 3-8.

11. Бахарев К. С., Гусев Н. Н., Малыгин И. Г. Проблемные вопросы создания региональной информационной системы мониторинга гидротехнических сооружений, объектов водозабора и водоочистки // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 3. – С. 48-53.
12. Малыгин И. Г., Чуприян А. П. Создание информационной системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера субъекта Российской Федерации // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – № 1. – С. 10-13.
13. Ложкина О. В., Ложкин В. Н., Малыгин И. Г., Комашинский В. И. К вопросу о развитии информационно-коммуникационного процесса управления экологической безопасностью автомобильного транспорта в городах // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 4(40). – С. 91-98.
14. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N., Malygin I. G., Rogodzinsky G. G. On Information Technology Development for Monitoring of Air Pollution by Road and Water Transport in Large Port Cities (St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol) // SITITO 2018: Modern Information Technology and IT Education. – 2018.- pp. 384–396.

References

1. Malygin I. G., Silnikov M. V. Intellektual'nye sistemy transportnoj bezopasnosti [Intelligent systems of transport security]. Problems of risk management in the technosphere, 2014, No. 1 (29), pp 1-13.
2. Malygin I. G. Intellektual'nye sistemy transportnoj bezopasnosti i puti vnedrenija ih v megapolisah [Intelligent transport security systems and ways to implement them in megacities]. Transport of Russia: problems and prospects - 2014, Proceedings of the international scientific and practical conference, Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko RAS, St. Petersburg, October 2014, pp 56-63.
3. Asaul A. N., Malygin I. G., Komashinsky V. I. Konceptual'nye podhody k postroeniju intellektual'noj mul'timodal'noj transportnoj sistemy RF [Conceptual approaches to the construction of an intelligent multimodal transport system of the Russian Federation]. Information and space, 2016, No. 3, pp 8-17.
4. Malygin I. G., Komashinsky V. I. Osobennosti postroenija i arhitektura perspektivnoj intellektual'noj mul'timodal'noj transportno-logisticheskoy sistemy [Features of building and architecture of a promising intelligent multimodal transport and logistics system]. Technologies for building cognitive transport systems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, PGUPS, May 2021, pp 7-14.
5. Ivanov A. Yu., Malygin I. G. Metod i algoritmy obespechenija celostnosti mobil'nyh raspredeennyh baz dannyh [Method and algorithms for ensuring the integrity of mobile distributed databases]. Problems of risk management in the technosphere, 2008, No. 4 (8), pp 183-190.
6. Malygin I. G., Kozmovsky D. V. Metody obespechenija bezopasnosti raspredeennyh informacionnyh sistem MChS Rossii, osnovannyh na analize trafika i kontrole setевой dejatel'nosti pol'zovatelej [Security methods for distributed information systems of the Ministry of Emergency Situations of Russia based on traffic analysis and control of user network activity]. Problems of risk management in the technosphere, 2013, No. 2 (26), pp 78-82.
7. Malygin I. G., Kuznetsova E. Yu. Proposals for the development of an intelligent system for managing the environmental safety of the Northern Sea Route. Marine Intelligent Technologies, 2022, v. 1, No. 1 (55), pp 121-127.
8. Malygin I. G., Gavkalyuk B. V., Kuznetsova E. Yu. Intellektual'naja sistema jekologicheskoy bezopasnosti – osnova arkticheskogo intellektual'nogo mul'timodal'nogo transportnogo koridora Rossijskoj Federacii [Intelligent system of environmental safety - the basis of the Arctic intelligent multimodal transport corridor of the Russian Federation]. Transport of Russia: problems and prospects - 2021: Proceedings of the International scientific and practical conference, Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko RAS, St. Petersburg, November 2021, pp 8-12.
9. Kattsyn D. V., Malygin I. G. Avtomatizirovannaja sistema kompleksnogo monitoringa za sostojaniem bezopasnosti ob#ektov OAO RZhD [Automated system for integrated monitoring of the state of safety of Russian Railways facilities]. Transport of Russia problems and prospects - 2010: All-Russian scientific and practical conference: Proceedings of the conference, Yu-Piter, St. Petersburg, November 2010, pp 114-118.
10. Malygin I. G., Komashinsky V. I., Kattsyn D. V. Nekotorye problemy postroenija kognitivnyh transportnyh sistem i setej [Some problems of constructing cognitive transport systems and networks]. Transport of Russia: problems and prospects - 2015: Proceedings of the Anniversary International Scientific and Practical Conference, Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko RAS, St. Petersburg, November 2015, pp 3-8.
11. Bakharev K. S., Gusev N. N., Malygin I. G. Problemnye voprosy sozdanija regional'noj informacionnoj sistemy monitoringa gidrotehnicheskikh sooruzhenij, ob#ektov vodozabора i vodoochistki [Problematic issues of creating a regional information system for monitoring hydraulic structures, water intake and water treatment facilities]. Pozharovzryvobezopasnost [Fire and Explosion Safety], 2007, t. 16, No. 3, pp 48-53.
12. Malygin I. G., Chupriyan A. P. Sozdanie informacionnoj sistemy monitoringa i prognozirovanija chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnoгенного haraktera sub#ekta Rossijskoj Federacii [Creation of an information system for monitoring and forecasting emergency situations of a natural and man-made nature of a subject of the Russian Federation]. Pozharovzryvobezopasnost [Fire and Explosion Safety], 2006, t. 15, No. 1, pp 10-13.
13. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N., Malygin I. G., Komashinsky V. I. K voprosu o razvitii informacionno-kommunikacionnogo processa upravlenija jekologicheskoy bezopasnost'ju avtomobil'nogo transporta v gorodah [On the development of the information and communication process of managing the environmental safety of road transport in cities]. Problems of risk management in the technosphere, 2016, No. 4(40), pp 91-98.

14. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N., Malygin I. G., Rogodzinsky G.G. On Information Technology Development for Monitoring of Air Pollution by Road and Water Transport in Large Port Cities (St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol). SITITO 2018: Modern Information Technology and IT Education, 2018, pp 384–396.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13.; профессор ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр.149 А., e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin – professor, Dr. Sci. (Eng), director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; St. Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, e-mail: malygin_com@mail.ru

Иван Николаевич Коновалов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: info@iptran.ru

Ivan N. Konovalov - PhD (Eng.), Scientific secretary, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: info@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 004.057.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.046>

Интеллектуализация информационных сетей с целью увеличения их производительности

Е.Е. Прозоровский¹ eeprozorov@yandex.ru, Ю.В. Редькин¹ redkin_yura@mail.ru,
А.А. Тюфанова¹ alina.34@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова

Аннотация. При разработке систем контроля и управления технологическими процессами значительное внимание уделяют информационным сетям, по которым осуществляется передача команд и данных между ее центром и объектами управления. Использование беспроводных самоорганизующихся сетей, основанных на платформе MeshLogic, является одним из перспективных вариантов построения такой информационной сети. В этой беспроводной сети все узлы равноправны и являются маршрутизаторами, что обеспечивает ей высокую живучесть и надежность. Однако, базовый алгоритм маршрутизации платформы MeshLogic не является оптимальным с точки зрения беспроводных систем контроля и управления. В работе предложен способ сокращения объема служебной части пакета путем применения укороченных адресов узлов сети. Показано, что такая модификация адресов не приводит к изменению пути прохождения пакетов по сети, но сокращает время их передачи. Кроме того, модификация адреса пакета позволяет сократить время доставки пакета в случае его искажения при передаче по сети. Предложен алгоритм маршрутизации пакетов с укороченными адресами. Реализация описанного способа адресации узлов сети и алгоритма маршрутизации узлами сети позволяет существенно сократить время доставки пакетов, как в случае ее нормальной работы, так и при искажении адресов передаваемых пакетов.

Ключевые слова: система контроля и управления, беспроводная самоорганизующаяся сеть, алгоритм маршрутизации.

Для цитирования: Прозоровский Е.Е., Редькин Ю.В., Тюфанова А.А. Интеллектуализация информационных сетей с целью увеличения их производительности, Морские интеллектуальные технологии 2022. № 4 часть 1, С. 222—227.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.046>

Intellectualization of information networks in order to increase their productivity

Evgeniy E. Prozorovskiy¹ eeprozorov@yandex.ru, Yuriy V. Redkin¹ redkin_yura@mail.ru,
Anastasia A. Tyufanova¹ alina.34@mail.ru

¹ Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. When developing control and management systems for technological processes, considerable attention is paid to information networks through which commands and data are transferred between its center and control objects. The using of wireless self-organizing networks based on the MeshLogic platform is one of the promising options for building such an information network. In this wireless network, all nodes are equal and are routers, which provides it with high survivability and reliability. However, the underlying routing algorithm of the MeshLogic platform is not optimal in terms of wireless monitoring and control systems. The paper proposes a method for reducing the volume of the service part of the packet by using shortened addresses of network nodes. It is shown that such modification of addresses does not lead to a change in the path of packets through the network, but reduces the time of their transmission. In addition, the modification of the packet address allows to reduce the delivery time of the packet in case of its distortion during transmission over the network. An algorithm for routing packets with shortened addresses is proposed. Implementation of the described method for addressing network nodes and the routing algorithm by network nodes can significantly reduce the time of packet delivery, both in the case of its normal operation and in case of distortion of the addresses of transmitted packets.

Keywords: monitoring and control system, wireless ad hoc network, routing algorithm.

For citation: Evgeniy E. Prozorovskiy, Yuriy V. Redkin, Anastasia A. Tyufanova, Intellectualization of information networks in order to increase their productivity, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 222—227.

Введение

Системы телемеханики – особый класс средств автоматизации, предназначенный для контроля и управления удаленными объектами, такими как: технологические объекты на морском флоте, различные портовые сети снабжения, электрические подстанции в морских портах, и логистических системах. Важной составной частью любой системы

телемеханики является информационная сеть, объединяющая ее объекты в единое целое. Как показано в [1], качество функционирования информационной сети является фактором обеспечения устойчивой работы современного порта.

При построении канала передачи данных в подобных системах в современных условиях целесообразно использовать беспроводные

информационные сети ISM (Industrial, Scientific, Medical). При реализации подобных сетей наиболее приемлемым является субгигагерцовый диапазон частот в полосе 2400-2483,5 МГц. Для реализации устройств данного диапазона существует множество многофункциональных микросхем производства различных компаний, а так же готовых модемов. Они могут использоваться без оформления соответствующего разрешения при условии соблюдения требований по ширине полосы, излучаемой мощности и назначению готового изделия. Однако практика показала, что в некоторых случаях эффективнее использовать более длинноволновые диапазоны (до 1 ГГц), поскольку они характеризуются меньшим затуханием и рассеиванием сигнала. Именно поэтому в настоящее время для построения беспроводных сетей систем телеметрии, выпускается оборудование не только для диапазона 2,4 ГГц, но и для частотного диапазона 868,7...869,2 МГц, который также является нелегальным в России.

Как показано в [2] для построения такой сети наиболее приемлемой является платформа MeshLogic, в которой все узлы сети равноправны и являются маршрутизаторами. В ней, для обеспечения связи с удаленными объектами, пакеты данных передаются по цепочке устройств, каждое из которых находится в радиовидимости другого. Такой способ построения информационной сети обладает рядом преимуществ, но при этом приходится решать задачи, связанные с выбором протокола передачи пакетов данных в информационной сети и метода маршрутизации пакетов данных.

Проведенный в [3] обзор методов маршрутизации позволил прийти к заключению о том, что использование того или иного метода маршрутизации обусловлено прежде всего выполняемыми задачами, структурой и организацией сети. В некоторых случаях существующие алгоритмы модифицируют с учетом конкретных требований. Необходимо отметить, что не существует единого универсального подхода к маршрутизации в беспроводных сетях, каждый раз в зависимости от ситуации выбирается наиболее подходящий метод, позволяющий достичь показателей, заданных техническими условиями.

В работе [4] приведен один из наиболее удачных вариантов модификации существующих алгоритмов маршрутизации применительно к системам контроля и управления технологическими процессами. В нем предложено отказаться от фиксированной длины кадра, характерной для технологии MeshLogic. Использование переменной длины кадра делает возможным выполнить «сборку» беспроводного модуля под конкретную задачу с характеристиками, оптимальными для этого случая. Построение путей маршрутизации передаваемых пакетов основано на использовании реактивного статического алгоритма. В этом алгоритме маршрутизации путь формируется на базовой станции и включается в передаваемый пакет [5]. Формирование маршрута осуществляется базовой станцией исходя из положения действующих устройств в пространстве. В такой сети нет подразделения на маршрутизаторы и конечные устройства, пакет может передаваться через любые узлы.

В соответствии с указанным алгоритмом маршрутизации путь формируется в виде последовательности адресов устройств, через которые должен будет пройти пакет. Формирование пути происходит на узле, подключенном к базовой станции на основе карты сети, составленной при монтаже устройств и присвоении им уникальных адресов. Без такой карты, нахождение пути, и, соответственно, использование сети невозможно. В самих периферийных устройствах не содержится какой-либо информации о маршруте, кроме собственного адреса устройства. Благодаря этому требования к аппаратным ресурсам такой сети минимальны. Для работы алгоритма достаточно при отправке пакета указать длину сформированного пути и в заголовочной части пакета выделить 1 байт под счетчик маршрутизации, по которому будет осуществляться управление продвижением пакета [6].

Путь, заданный в пакете, представляется устройством как массив переменных (адресов устройств). Счетчик маршрутизации – как индекс в этом массиве, по которому нужно извлечь адрес устройства. После извлечения адреса, устройство сравнивает его со своим адресом. Если они не совпадают – это означает, что данное устройство не должно участвовать в дальнейшей передаче этого пакета и он уничтожается. Если адреса совпадают, необходимо проверить, является ли устройство, принявшее пакет, конечной точкой пути или же пакет необходимо передать дальше. Для этого сравнивается значение счетчика маршрутизации и длина пути, уменьшенная на единицу. Если они совпадают – пакет достиг устройства назначения, если нет, устройство увеличивает счетчик маршрутизации на единицу и передает пакет далее. По мере продвижения пакета по пути, счетчик маршрутизации будет увеличиваться – устройства, уже переславшие пакет, не будут пересылать его повторно. При достижении пакетом адресата, путь, хранящийся в нем, не уничтожается – если необходимо отправить ответ, на его основе формируется обратный путь. Последовательность узлов переставляется в обратном порядке, а счетчик маршрутизации сбрасывается. После этого ответный пакет может быть передан обратно по цепочке маршрутизаторов.

Постановка задачи

Достоинством описанного алгоритма является возможность использования на отдельных участках информационной сети как проводных (в том числе отрезков силовых линий электропередачи), так и беспроводных каналаобразующих устройств. Впервые подобный вариант построения сети был реализован в системе телемеханики городских электрических сетей [7]. Опытный образец системы был внедрен на предприятии новороссийских городских электрических сетей в 1992 году. Промышленные образцы системы эксплуатируются в различных регионах России с 1996 года.

Положительный опыт эксплуатации данной системы в течение длительного времени [8] позволил выявить следующие недостатки:

– в указанной системе каждому периферийному узлу присвоен двухбайтный адрес, поэтому имеет

место избыточно большой объем служебной информации в передаваемом пакете данных;

– сбой в работе системы приводит к длительному процессу ожидания ответа периферийного узла сети на запрос базовой станции. При этом приходится осуществлять повторный сеанс связи между базовой станцией и соответствующим периферийным узлом.

Сокращение объема служебной части пакета

Что касается первого из отмеченных недостатков, он может быть устранен за счет того, что в адресной части передаваемого пакета данных указывается лишь младший байт адреса каждого промежуточного узла. Для пояснения ситуации на рис. 1 в качестве примера приведена структура фрагмента информационной сети. Адрес каждого периферийного узла представлен в виде дроби, младший байт адреса – в числителе, старший – в знаменателе.

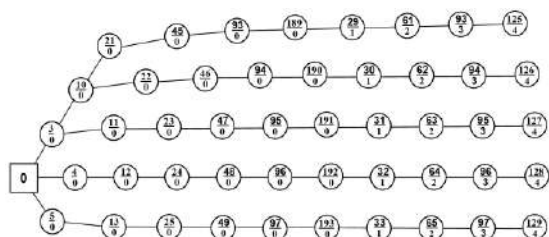


Рис. 1 Структура фрагмента сети

Пусть требуется передать пакет от базовой станции к устройству с адресом 94/3. Доставка информации на указанный объект возможна по нескольким маршрутам. Одним из решений, позволяющим значительно уменьшить накладные расходы при решении задачи маршрутизации является алгоритм поиска кратчайшего пути FSR (Fisheye State Routing) [9]. В простейшем случае для выбора наиболее краткого пути целесообразно между базовой станцией и выбранным объектом провести прямую линию и ближайшие к полученной линии объекты включить в маршрутную таблицу [2]: 4/0 – 12/0 – 23/0 – 47/0 – 95/0 – 191/0 – 30/1 – 62/2 – 94/3. Содержание соответствующего информационного пакета, формируемого на базовой станции, приведено на рис. 2.

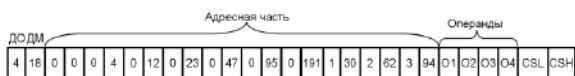


Рис. 2 Пример передаваемого пакета данных: ДО – длина операнда; ДМ – длина маршрута

Нетрудно заметить, что исключение из адресной части пакета старшего байта адреса каждого промежуточного узла сети не приводит к потере информации о требуемом маршруте. Однако за счет этого существенно уменьшается объем передаваемого по сети пакета данных. На рис. 3 приведено содержание модифицированной таким способом адресной части пакета.

Уменьшение объема передаваемого пакета приводит к сокращению времени, в течение которого канал связи занят передачей сообщения и, соответственно, к увеличению производительности информационной сети.



Рис. 3 Содержание модифицированного пакета данных

Сокращение времени доставки пакета при сбое в работе сети

Более того, предложенная модификация адресной части пакета позволяет уменьшить вероятность сбоя в работе сети, который может наступить в результате действия помех в канале связи. Тем самым несколько смягчается и ситуация, связанная со вторым из отмеченных ранее недостатков существующей системы.

Сбой в работе системы возможен в двух случаях:

- при выходе из строя одного из промежуточных узлов сети;
- при искажении пакета данных по мере его распространения в канале связи.

Что касается первого фактора, в работе [10] указан один из возможных вариантов локализации неисправного узла сети при минимальных временных затратах.

Искажение пакета возможно, как в его адресной части, так и в информационной. Искажение в адресной части приводит к тому, что пакет теряется в сети и не находит своего адресата. При этом теряется значительное время на базовой станции в ожидании ответа, которого в случае искажения адреса не может быть в принципе. Искажение сигнала в информационной части пакета в конечном итоге приводит к необходимости осуществлять повторный сеанс связи. При этом промежуток времени, необходимый для получения запрашиваемой информации, увеличивается, как минимум, в два раза.

Существенно сократить потери времени возможно за счет того, что вместо повторного сеанса связи в системе в целом, осуществляется повторная передача данных в локальном участке сети, на котором произошел сбой. Один из вариантов алгоритма реализации указанной возможности приведен на рис. 4. Пусть при передаче пакета от базовой станции к устройству с адресом 94/3 узел 47/0 принимает сигнал без искажений. Содержание пакета, поступившего на вход узла 47/0, приведено на рис. 5. После приема данного пакета число 23, расположенное на первой позиции адресной части (A1), запоминается в качестве адреса родительского узла (блок 1 алгоритма). Далее в блоке 2 осуществляется сравнение собственного адреса (АС) с адресом, расположенном на второй позиции адресной части (A2). Совпадение адресов является признаком того, что именно данный узел должен продолжить ретрансляцию пакета в сети. В блоке 3 алгоритма вычисляется контрольная сумма принятого пакета (CSC). При совпадении принятой контрольной суммы (CSR) с расчетной (блок 4 алгоритма) формируется пакет для его дальнейшей ретрансляции в сети (блок 5).

Содержание вновь сформированного пакета приведено на рис. 6. В рамках блока 7 алгоритма происходит передача сформированного пакета данных. Данный пакет принимается всеми узлами, расположенными около объекта с адресом 47/0 в том числе и узлом с адресом 95/0. При отсутствии

искажений данным узлом формируется пакет для его дальнейшей ретрансляции (подобно тому, как это происходило на предшествующем узле). Этот пакет принимается всеми соседними узлами, в том числе и объектом с адресом 47/0, для которого он является квитанцией, свидетельствующей о нормальной работе информационной сети. Квитанция принимается и анализируется блоками 9, 10, 12 алгоритма, после чего очередное действие алгоритма обработки на узле 47/0 заканчивается.

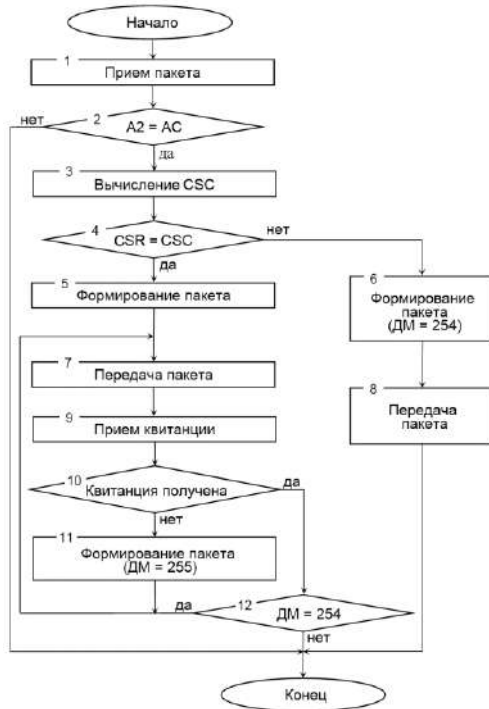


Рис. 4 Алгоритм повторной передачи пакета данных в локальном участке сети

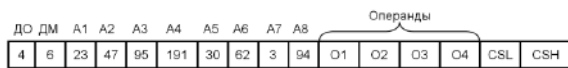


Рис. 5 Содержание пакета данных на входе узла 47/0

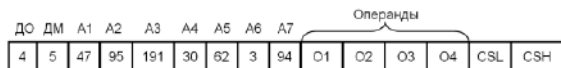


Рис. 6 Содержание пакета данных, сформированного узлом 47/0

Если имеют место искажения сигнала при его распространении между узлами 47/0 и 95/0 в блоке 4 алгоритма его обработки фиксируется несовпадение CSR и CSC. В результате формируется и передается пакет данных (блоки 6, 8), в котором установлено значение числа ДМ = 254. Как и в предыдущем случае, этот пакет в качестве квитанции принимается узлом 47/0 (блок 9 алгоритма). В результате анализа (блоки 10, 12) происходит переход на повторную передачу ранее сформированного пакета (рис. 6).

При выходе из строя узла 95/0 квитанция не формируется. Анализ ситуации на узле 47/0 (блок 10)

приводит к формированию пакета, в котором установлено значение числа ДМ = 255. Этот пакет передается в сторону базовой станции, после чего очередное действие алгоритма обработки заканчивается. После получения данного пакета на базовой станции инициируется поиск нового маршрута в обход неисправного узла 95/0. Процедура поиска нового маршрута приведена в работе [11].

Следует отметить, что искажение сигнала при его распространении в информационной сети возможно, как на пути от базовой станции к периферийному узлу, так и в обратном направлении. Если пакет является ответным на запрос базовой станции и искажений к моменту его поступления на узел 95/0 не имело места, данным узлом формируется и передается пакет, структура которого приведена на рис. 7. Число 128, расположенное в позиции ДМ пакета, является признаком того, что данный пакет является ответным на запрос базовой станции. На позициях A1 и A2 располагаются соответственно адрес запрашиваемого и родительского узлов. Данный пакет принимается всеми соседними узлами. Для узла 191/0 он является квитанцией, являющейся свидетельством того, что на данном участке сети сбой не имело места. Узел 47/0 должен продолжить ретрансляцию пакета в сторону базовой станции. Для этого в позиции A2 пакета вместо числа 47 необходимо разместить адрес родительского узла (в данном случае число 23), а в позициях CSL и CSH вновь рассчитанную контрольную сумму.



Рис. 7 Содержание ответного пакета данных

Однако, если в результате сбоя в работе сети пакет узлом 47/0 принят с искажением, в блоке 4 алгоритма будет зафиксировано несовпадение CSR и CSC. В дальнейшем все происходит аналогично тому, как и при прямом направлении передачи пакета данных в сети. В конечном итоге узлом 95/0 будет осуществлена повторная передача пакета, содержание которого приведено на рис. 7.

Заключение

Таким образом, предложенная модификация адресной части пакетов, передаваемых по информационной сети системы контроля и управления, позволяет существенно сократить время их доставки адресату. Кроме того, описанный алгоритм маршрутизации пакетов с модифицированной адресной частью позволяет в случае их искажения организовать повторную передачу пакетов по локальному участку сети, вместо их повторной передачи от базовой станции, что также сокращает время доставки пакетов. В конечном итоге это приводит к увеличению пропускной способности информационной сети, что существенно повышает оперативность работы системы контроля и управления.

Литература

1. Панамарев Г.Е., Боран-Кешишьян А.Л. Роль современных информационных технологий в обеспечении устойчивости работы морского порта. Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010. 338 с.
2. Баскаков С.С. Опыт применения радиочастотных модулей MeshLogic для разработки беспроводных систем сбора данных. Беспроводные технологии. 2009. № 3. С. 44-47.
3. Бершадский А.М., Курилов Л.С., Финогеев А.Г. Обзор методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 1 (21). С. 47-57.
4. Иванов В.Э., Левенец А.В., Чье Ен Ун. Проблемно-ориентированные сенсорные сети: практический подход. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 219 с.
5. Остерлох Х. Маршрутизация в IP сетях. Принципы, протоколы, настойка: Пер. с англ. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. 512 с.
6. Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. Москва: Техносфера, 2009. 472 с.
7. Прозоровский Е.Е. Повышение эффективности высокочастотной связи в распределительных силовых сетях. Электросвязь, 2010. № 5, с. 53-55.
8. Фирсов М.И., Овчинников А.Г. Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированной системы управления технологическими процессами в городских электрических сетях на примере МРУП «Щелковские электрические сети» Московской области / Руководящие материалы по проектированию распределительных электрических сетей. – М. ОАО РАО «ЕЭС России», ОАО «РОСЭП». 2004. Вып. 4, с. 59-70.
9. Pei G., Gerla M., Chen T.-W. Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks / Proc. ICC 2000, New Orleans. 2000. doi: 10.1109/ICC.2000.853066
10. Прозоровский Е.Е., Рагозин Е.А., Пердофориди К.С. и др. Маршрутизация в беспроводных сетях систем телемеханики. Эксплуатация морского транспорта. 2018. № 4 (89). С. 121-127.
11. Прозоровский Е.Е., Редькин Ю.В. Повышение эффективности методов маршрутизации в беспроводных сетях систем телеметрии. Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 4. № 2(52). С. 92-96.

References

1. Panamarev G.E., Boran-Keshish'yan A.L. Rol' sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy v obespechenii us-toyчивosti raboty morskogo porta [The role of modern information technologies in ensuring the sustainability of the seaport]. Novorossiysk: MGA im. adm. F.F. Ushakova, 2010. 338 s.
2. Baskakov S.S. Opyt primeneniya radiochastotnykh moduley MeshLogic dlya razrabotki besprovodnykh sistem sbora dannykh [Experience in the use of MeshLogic RF modules for the development of wireless data acquisition systems]. Besprovodnye tekhnologii. 2009. № 3. S. 44-47.
3. Bershadskiy A.M., Kurilov L.S., Finogeev A.G. Obzor metodov marshrutizatsii v besprovodnykh sensorykh setyakh [Overview of routing methods in wireless sensor networks] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2012. № 1 (21), S. 47-57.
4. Ivanov V.E., Levenets A.V., Ch'e En Un. Problemno-orientirovannyye sensorye seti: prakticheskiy podkhod [Domain-Based Sensor Networks: A Practical Approach]. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2015. 219 s.
5. Osterlokh Kh. Marshrutizatsiya v IP setyakh. Printsipy, protokoly, nastoyka [Routing in IP networks. Principles, protocols, tincture]: Per. s angl. SPb.: ООО «DiaSoftYuP», 2002. 512 s.
6. Vishnevskiy V.M., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V. Entsiklopediya WiMAX. Put' k 4G [WiMAX Encyclopedia. The path to 4G]. Moskva: Tekhnosfera, 2009. 472 s.
7. Prozorovskiy E.E. Povyshenie effektivnosti vysokochastotnoy svyazi v raspredelitel'nykh silovykh setyakh. [Improving the efficiency of high-frequency communication in distribution power networks]. Elektrosvyaz'. 2010. № 5, S. 53-55.
8. Firsov M.I., Ovchinnikov A.G. Opyt vnedreniya i ekspluatatsii avtomatizirovannoy sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v gorodskikh elektricheskikh setyakh na primere MRUP «Shchelkovskie elektricheskije seti» Moskovskoy oblasti [Experience in the implementation and operation of an automated process control system in urban electrical networks on the example of MRUE «Schelkovo Electric Networks» of the Moscow Region] / Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu raspredelitel'nykh elektricheskikh setey. – M. ОАО РАО «ЕЭС России», ОАО «РОСЭП». 2004. Vyp. 4. S. 59-70.
9. Pei G., Gerla M., Chen T.-W. Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks Proc. ICC 2000, New Orleans. 2000. doi: 10.1109/ICC.2000.853066
10. Prozorovskiy E.E., Ragozin E.A., Perdoforidi K.S. i dr. Marshrutizatsiya v besprovodnykh setyakh system telemekhaniki [Routing in wireless networks of telemechanics systems] Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2018, № 4 (89), S. 121-127.
11. Prozorovskiy E.E., Redkin Yu.V. Povyshenie effektivnosti metodov marshrutizatsii v besprovodnykh setyakh sistem telemetrii [Improving the efficiency of routing methods in wireless networks of telemetry systems] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021, T.4, N 2(52), S. 92-96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Евгеньевич Прозоровский, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93, Российская Федерация, e-mail: eeprozorov@yandex.ru

Evgeniy E. Prozorovskiy, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of radio electronics and information technology, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenina Av. 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: eeprozorov@yandex.ru

Юрий Викторович Редькин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93, Российская Федерация, e-mail: redkin_yura@mail.ru

Yuriy V. Redkin, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of radio electronics and information technology, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenina Av. 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: redkin_yura@mail.ru

Анастасия Александровна Тюфанова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93, Российская Федерация, e-mail: alina.34@mail.ru

Anastasia A. Tyufanova, Ph. D. (Eng), Assistant Professor, Associate Professor of the Department of radio electronics and information technology, Admiral Ushakov Maritime State University, 93, Lenina avenue, Novorossiysk, Krasnodar region, 3533309, Russian Federation, e-mail: alina.34@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.047>

Метод диагностики, мониторинга элементов и узлов безэкипажного судна с применением AR-функционала

В.В. Заслонов¹ djdf3d@yandex.ru, А.А. Головина¹ a.a.golovina@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В период развития новых технологий в рамках морской транспортной отрасли, в частности безэкипажных судов, требуются квалифицированные кадры, отвечающие современным устоям, имеющие навыки эксплуатации и сервиса. Подобные технологии подразумевают применение новых технологических инструментов, которые, например, обеспечивали бы дистанционный мониторинг элементов и узлов судна. В статье рассмотрен алгоритм, который адаптирован в программный код, который был представлен изначально как программа, которая при вводе данных напряжения и циклов, можно было получить график с доверительной зоной и линией аппроксимации, по которым можно определить момент деформации рассматриваемой конструкции. В дальнейшем, было описано адаптации концепции данной программы по прогнозированию прочности материалов в систему, применяемой дополненную реальность. Данный инструмент является эффективным средством по сервису, ремонту и эксплуатации механизмов, устройств, судов и др., так как специалист сможет считывать необходимые данные с датчиков для последующей диагностики, которая в рекомендательном порядке предоставит информации. По дальнейшему режиму эксплуатации конструкции или устройства для предотвращения аварий, поломок и др. В статье предоставлено обоснование применения систем дополненной реальности для сервиса и эксплуатации, а также описаны некоторые правовые и образовательные проблемы, которые возникают при введении данного инструмента для использования в рабочих циклах.

Ключевые слова: Безэкипажное судно, дополненная реальность, элементы морского судна, механика разрушений, стандартизация, мониторинг, диагностика.

Для цитирования: Заслонов В.В., Головина А.А. Инструмент диагностики, мониторинга элементов и систем безэкипажного судна с применением AR-функционала. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 228—235.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.047>

Method of diagnostics, monitoring of elements and assemblies of an unmanned vessel using AR-functionality

Vladimir V. Zaslouov¹ djdf3d@yandex.ru, Anastasia A. Golovina¹ a.a.golovina@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. During the period of development of new technologies within the maritime transport industry, in particular, unmanned vessels, qualified personnel are required that meet modern standards, have operational and service skills. Such technologies imply the use of new technological tools, which, for example, would provide remote monitoring of elements and components of the vessel. The article considers an algorithm that is adapted into a program code, which was originally presented as a program that, when entering stress and cycle data, it was possible to obtain a graph with a confidence zone and an approximation line, by which it is possible to determine the moment of deformation of the structure in question. In the future, it was described the adaptation of the concept of this program for predicting the strength of materials into a system using augmented reality. This tool is an effective tool for the service, repair and operation of mechanisms, devices, ships, etc., as a specialist will be able to read the necessary data from sensors for subsequent diagnostics, which will provide information in a recommendatory manner. According to the further mode of operation of the structure or device to prevent accidents, breakdowns, etc. The article provides a justification for the use of augmented reality systems for service and operation, as well as describes some legal and educational problems that arise when introducing this tool for use in work cycles.

Key words: Unmanned vessel, augmented reality, elements of a sea vessel, fracture mechanics, standardization, monitoring, diagnostics.

For citation: Vladimir V. Zaslouov, Anastasia A. Golovina. Instrument for diagnostics, monitoring of elements and systems of an unmanned vessel using AR-functionality. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 228—235.

Введение

Безэкипажное судоходство – динамично развивающееся направление в морской транспортной отрасли, которое учитывает аспекты, описывающие системы управления, позиционирования, конструирования, подготовки специалистов, развитие береговой инфраструктуры и др. Для обеспечения систематизации, Международная морская организация (далее – ММО) в 2018 году произвела классификацию, выделив следующие уровни автономности:

1. Судно, оснащенное возможностью осуществления автоматизированных процессов, поддержкой принятия решений, где «судовая команда» находится на борту для управления и контроля судовыми системами,

2. Дистанционно управляемое морское судно с членами экипажа судна на борту.

3. Дистанционно управляемое судно, но без экипажа на борту.

4. Специальная операционная система судна, которая способна самостоятельно принимать решения и определять действия, определяет морское судно, как автономное [1].

Необходимо отметить, что данная рекомендательная классификация относится к любым типам судов, оснащенных одним из видов автоматизации – вспомогательным судам, торговым судам и др.

Важно понимать, что указанное направление в отрасли находится на начальном этапе своего развития, в связи с чем новые технологии будут вводиться постепенно. Кроме того, существует ряд сопутствующих проблемных вопросов, требующих решения для обеспечения эффективной, конкурентоспособной и безопасной практики внедрения и эксплуатации автономных судов, среди которых, например, можно выделить следующие:

1. Вопросы стандартизации создания, проектирования, эксплуатации автономных судов и, в частности, применимости к данным процессам существующих стандартов.

2. Проблемы правового регулирования отношений, возникающих в сфере автономного судоходства:

- законодательное закрепление соответствующего понятийного аппарата,

- законодательное закрепление особенностей правового статуса автономных судов, а также лиц, ими управляющих [10],

- определение и последующее закрепление в нормативных документах функций лиц, вовлеченных в процесс эксплуатации безэкипажного судна (максимально подробно и точно) [2],

- установление пределов ответственности субъектов, участвующих в проектировании, создании, эксплуатации автономных судов и так далее.

3. Проблемы морского страхования в условиях автономного судоходства:

- определение особенностей морского страхования в данной области с учетом рисков, предположительно характерных для автономного судоходства и так далее.

4. Проблемы обеспечения отрасли автономного судоходства кадрами:

- определение требований, предъявляемых к специалистам, осуществляющим управление автономными судами,

- определение функций, возлагаемых на указанных специалистов,

- разработка стандартов профессиональной подготовки и переподготовки указанных специалистов и прочее.

Как уже было отмечено выше, с учетом того, что автономное судоходство представляет собой относительно новую, развивающуюся отрасль, решение указанных и прочих проблемных вопросов будет осуществляться постепенно. Тем не менее, для внедрения практики использования автономных судов уже сейчас требуются если не постоянные, то универсальные решения и, в частности, универсальные технологии.

К таковым, например, системы анализа и мониторинга прочности конструкций, механизмов, корпуса, посредством дополненной реальности (далее –AR [3]).

Подобное технологическое направление может стать актуальным, в частности для разрабатываемых в научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация судоходства» в ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова азимутальных буксиров-автоматов (далее – АБА) для удаленного мониторинга в основном за корпусом [4].

1. Материалы и методы

Прогнозирование усталостной прочности материалов какого-либо узла (части) судна можно отнести к промежуточным этапам эксплуатации (диагностирования). По причине высокой трудоемкости процесса, и, следовательно, высокой стоимости, анализ, мониторинг усталостной прочности в рамках автоматизированной системы прогнозирования является актуальным направлением разработки.

Используя системы AR, механик (инженер, оператор) восполняет определенный объем информации, который отсутствует при обычном наблюдении или показаний устройств, информации, полученных благодаря датчикам. Виртуально смоделированная информация накладывается на реальное изображение, описывающее процессы или прогнозирующее ситуации.

Среди специалистов отрасли возник спор относительно применения AR как в судоходстве, так и в эксплуатации механизмов. Очевидный способ определения объективной востребованности технологии, является определения получаемого объема информации специалистов для анализа для последующего принятия решения.

В данной статье рассмотрен расчет объема информации, адаптированный под определенные навигационные задачи для мониторинга состояния корпуса, выполняемого АБА совместно с каким-либо торговым судном. Остановимся на комбинаторном подходе в рамках понятия «Количества информации» А. Н. Колмогорова [5].

Пусть конкретная переменная принимает значения, которое принадлежит конечному множеству X , состоящее из N количества элементов. Таким образом, «энтропия» переменной x равна (например, перемещение судна из точки «А» в точку «В», за временной период) [6]:

$$H(x) = \log_2 N.$$

$x = a$, тогда «убираем» энтропию, сообщая то, что:
 $I = \log_2 N.$

Переменные соответствуют и состоят из конкретных элементов, например, путь судна состоит из участков трека, которые в сумме складываются в искомую величину, а именно, периоды времени на дистанциях определения трека:

$$H(x_1, x_2 \dots x_k) = H(x_1) + H(x_2) + \dots + H(x_k).$$

Для передачи количества информации употребляем

$$I' = \begin{cases} I - \text{при целом} \\ [I] + 1 - \text{при дробном} \end{cases}$$

двоичных знаков.

$$2. H(X_T) = \frac{\log(\pi \Delta R \frac{n}{360^\circ})}{\Delta X_T}$$

ΔX_m – направление течения рассматриваемого участка;

n – градус рассматриваемого сектора;

ΔR – радиус рассматриваемой окружности.

$$3. H(v_m) = \frac{\log((\pi \Delta R \frac{n}{360^\circ}) / \Delta(T_1 - T_2))}{\Delta v_m}$$

Δv_m – скорость течения с определенным направлением рассматриваемого участка;

Например, количество случаев морских маневров при k возможных контактов буксира и торгового судна равно $2^k(k+1)$. Таким образом, количество информации:

$$I = k + \log_2(k + 1),$$

для двоичного кодирования необходимо $I' \approx k + \log_2 k$.

Рассмотрим случай взаимодействия АБА и торгового судна, а именно контакт корпусов и зоны подвергающиеся нагрузкам (рисунок 1) [7].

1. Приближение к причалу:

$$1. H(X_{\text{ц}}) = \frac{\log((\pi \Delta R \frac{n}{360^\circ}) * 0,5)}{\Delta X_{\text{ц}}}$$

$\Delta X_{\text{ц}}$ – центр рассматриваемого участка канала;

ΔR – радиус рассматриваемого участка.

n – градус сектора рассматриваемого участка;

$\Delta T_1, \Delta T_2$ – интервал времени;

ΔR – радиус окружности рассматриваемого участка.

$$4. H(L_\phi) = \frac{\log(\pi \Delta R \frac{n}{360^\circ})}{\Delta L_\phi}$$

ΔL_ϕ – длина фарватера рассматриваемого участка;

ΔR – радиус рассматриваемого участка.

Вывод: $H(X_{\text{ц}} X_m v_m L_\phi) = H(X_{\text{ц}}) + H(X_m) + H(v_m) + H(L_\phi)$

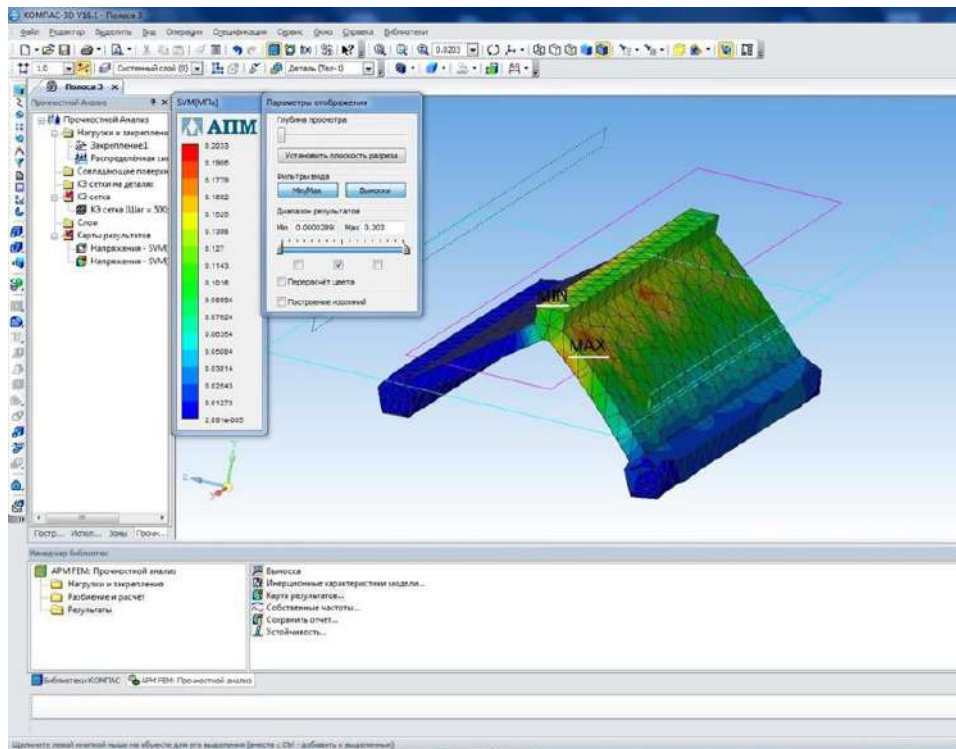


Рис. 1. Виртуальный эксперимент одного из вариантов килевой конструкции (в данном примере скулового типа – адаптированный вариант для АБА) во время контакта с грузовым судном

2. Приближение к судну:

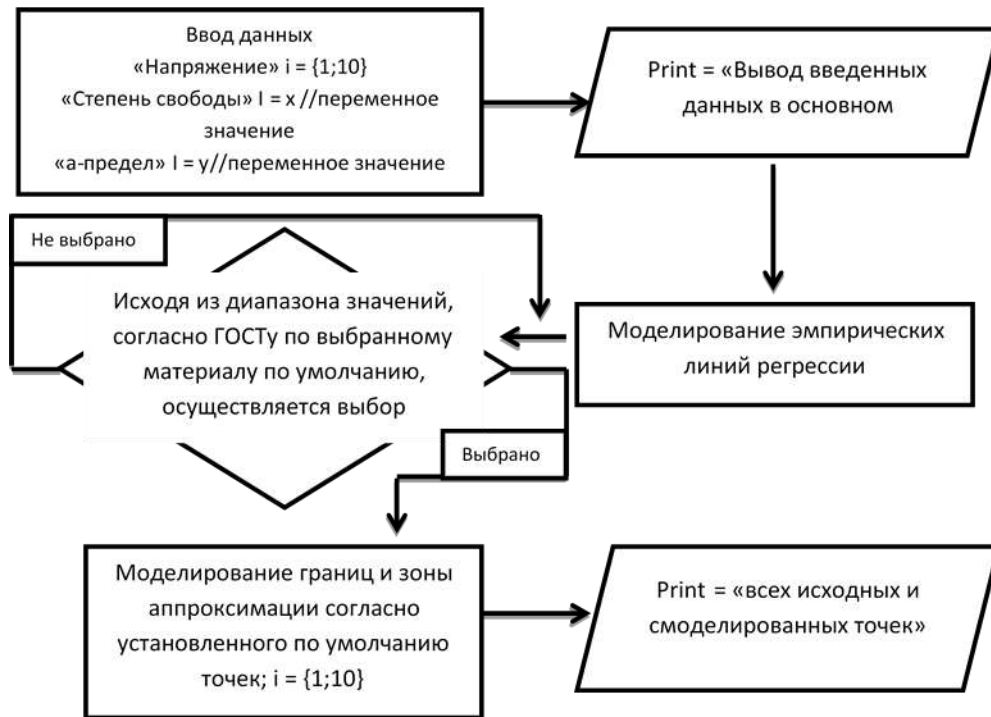


Рис. 3 – Алгоритм функционирования программы

Определяем логарифм напряжения и долговечности:

$$x_i = \lg(\sigma),$$

$$y_i = \lg(N),$$

где σ – напряжение, N – долговечность (циклы).

Вычисляем значение y_m , x_m – переменные осей эмпирической кривой

$$y_m = \sum y_i / N_{y_i},$$

$$x_m = \sum x_i / N_{x_i},$$

где N_{y_i} – количество значений y_i , x_i .

Определяем b

$$b = (\sum[(x_i - x_m) * y_i]) / (\sum[(x_i - x_m)^2]),$$

$$a = y_m,$$

где a и b – параметры эмпирической линии регрессии.

Высчитываем Y_i считаящиеся эмпирическим уравнением регрессии:

$$Y_i = a + b * (x_i - x_m),$$

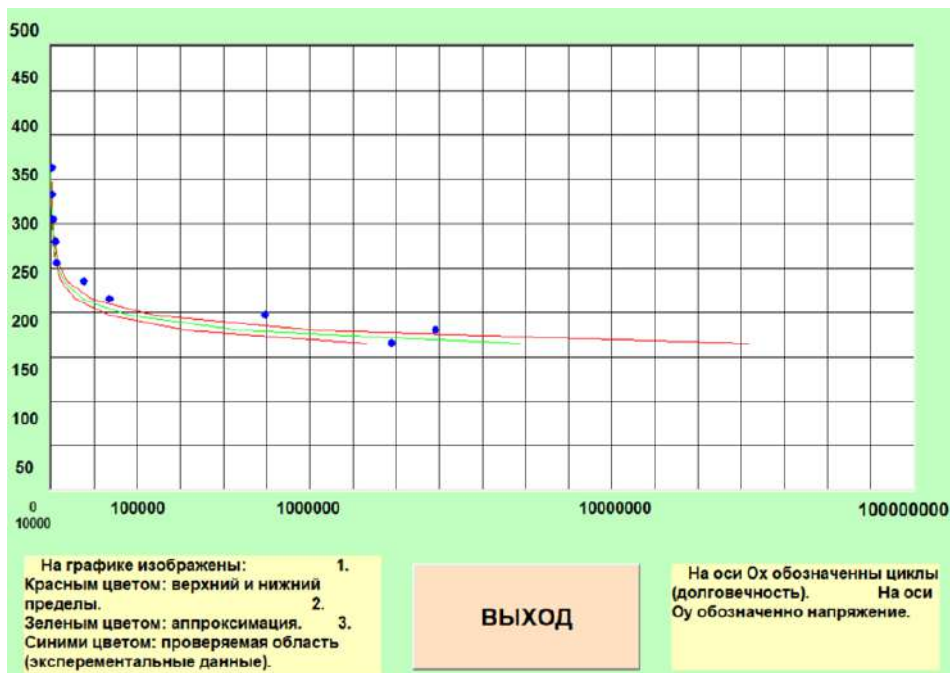


Рис. 4. Пример результата графика по прогнозированию прочности корпуса судна – результат исследования, при котором возникает ситуация деформации корпуса при определенной нагрузке.

Определяем s^2 - дисперсия эмпирической линии регрессии:

$$s^2 = (\sum[(x_i - x_m)^2]) / (N_{y_i} - 2),$$

После находим

$$s^2_a = s^2 / N_{y_i},$$

$$s^2_b = s^2 / s^2_a,$$

Определяем дисперсию оценки математического ожидания:

$$S_{Y_i}^2 = s^2_a + s^2_b * (x_i - x_m)^2,$$

$$S_{Y_i} = \sqrt{S_{Y_i}^2}.$$

Учитываем постоянные α, k и α .

$$N_n = 10^{(Y_i - t_{\alpha, k} * S_{Y_i})},$$

$$N_b = 10^{(Y_i + t_{\alpha, k} * S_{Y_i})},$$

$$N_a = 10^{(t_{\alpha, k} * Y_i)},$$

где N_n, N_b, N_a – нижний, верхний предел и аппроксимация соответственно (Рисунок 4).

Выводы

Данное программное обеспечение необходимо связать с конкретными датчиками для получения необходимого перечня информации, чтобы обеспечить функционирование алгоритма в рамках программы. Далее соответствующий специалист, при осуществлении сближения двух судов или при непосредственном контакте, может получить информацию по текущему анализу качественного состояния корпуса судна, осуществлять прогнозирование прочности и определять заблаговременно дефекты при определенных режимах эксплуатации в определенных секторах корпуса судна, мониторинг которого ведется.

Таким образом, имея возможность наложения визуальных моделей и информации в процессе эксплуатации судна, можно:

- Моделировать спектральные модели, которые могут накладываться на изображение реального транслируемого изображения или модели;
- Осуществлять прогнозирование прочности;
- Планировать эксплуатационные графики (режимы);
- Предотвращать выходы из строя механизмов или каких-либо аварий.
- Концепт применения ДР и описанного программного средства, следующий [9]:
- Программная среда загружено на микрокомпьютер или связана с микроконтроллером через планшет. При вводе и/или считывании текущий переменных (показателей) формируется база из переменных, учитывающая ряд постоянных и стандарты.
- Далее программа, как описано ранее производит расчет искомым значений с последующим построением кривых.

– Результат математического моделирования проецируется на изображение места модель или узла.

– Кроме того, при применении тензометрических датчиков, возникает возможность непрерывного мониторинга – в случае отклонения показаний от нормы.

Необходимо отметить, что данный инженерный инструмент способен упростить процесс испытаний транспортных технологий, повысить качество эксплуатации, предотвращать аварийные ситуации.

Так же, данное направление может стать заменой сложных процессов, с которыми сталкиваются инженеры при моделировании и диагностики с помощью специальных программ (рисунок 5).

Важно отметить, что данное средство является универсальным и может применять, так же и на классических судах с экипажем, а не только удаленно, как в случае безэкипажных судов.

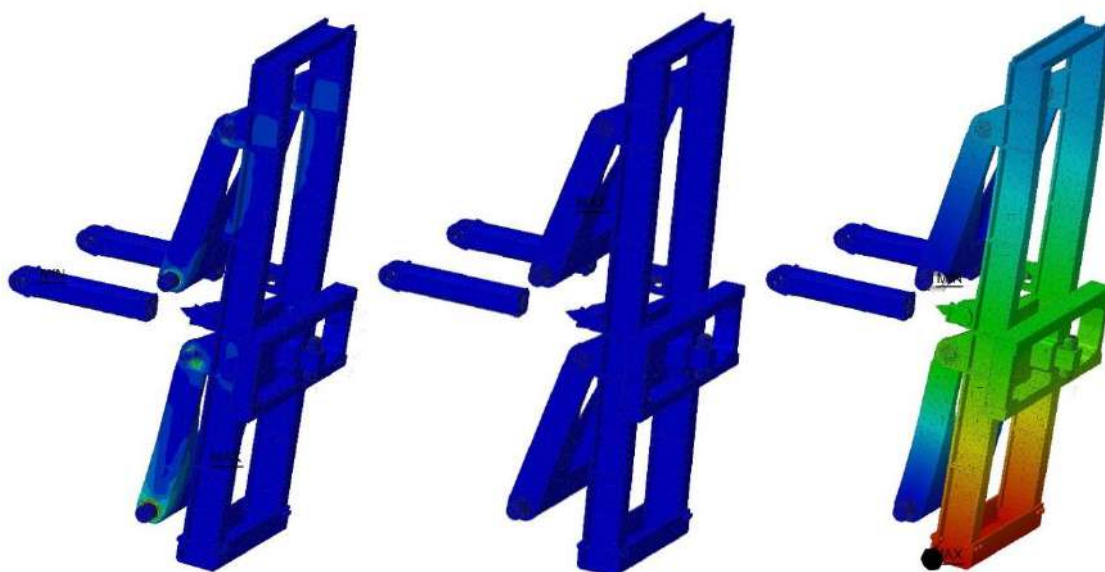


Рис. 5 – Этап виртуального прогнозирования прочности одного из вариантов узла системы швартовки АБА во время контакта с грузовым судном

Литература

1. Заслонов, В.В., Головина А.А. Сущность и проблемные аспекты использования метода «стая» для управления группой морских подвижных объектов. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. №.2 (4). С.132-139.
2. Абрамян С.К., Голубкина К.В. Межведомственные взаимодействия органов управления водным транспортом Российской Федерации. *Морские Интеллектуальные технологии*. 2019. № 1-2 (40). С. 82-85.
3. Vladimir V. Zaslouov, Anastasiya A. Golovina, and Anatolii N. Popov. Creating a Crewless Ship in the Framework of the Technological Paradigm of the Russian Federation. *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration*. Volume 1 (115).2020. P.468-474.
4. Устинов В.В., Зеленков Г.А. Проблемы создания беспилотных портовых буксиров-кантовщиков и концептуальные пути их решения. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. №4 (46) т.3. С 111-119.
5. Николаев Н.И., Гриценко М.В., Герасиди В.В. Результаты контроля вибрации судовых технических средств в эксплуатации в соответствии с требованиями правил РС и зарубежных норм. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4-3 (46). С. 96-103.
6. Самойленко А.Ю., Туркин В.А., Бушланов В.П. Формирование базы экспериментальных данных для исследования рабочих циклов судовых дизелей. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 1-2(43). С. 59-62.
7. Юдин Ю.И., Боран-Кешишьян А.Л., Петров С.О., Глинская И.В. Метод математического моделирования производительности пропульсивной системы «Азипод». *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 3 (41) т. 1. С. 222-228.
8. Senchenko V., Lopatina V., Studenikin D., Butsanets A. Technical automation tools for high-precision navigation of sea and river vessels. *Lecture Notes on Civil Engineering*. 2021. 130 LNCE. pp. 157-163.
9. Астреин В.В., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л. Представление прецедентов в судовой СППР безопасности судовождения. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. 3-4(46), С. 147-152
10. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web Conf*. 2022. 134. 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114

References

1. Zaslouov, V.V., Golovina, A.A. Sushchnost' i problemnye aspekty ispol'zovaniya metoda «staya» dlya upravleniya gruppoj morskikh podviznykh ob"ektov [The essence and problematic aspects of using the "flock" method to control a group of mobile marine objects]. *Morskije Intellektual'nye tekhnologii*. 2021. №.2 (4), pp.132-139.
2. Abramyan S. K., Golubkina K. V. Mezhhvedomstvennyye vzaimodeystviya organov upravleniya vodnym transportom Rossiyskoy Federatsii [Interdepartmental interactions of water transport management bodies of the Russian Federation]. *Morskije Intellektual'nye tekhnologii*. 2019. № 1-2 (40), pp. 82-85.
3. Vladimir V. Zaslouov, Anastasiya A. Golovina, and Anatolii N. Popov. Creating a Crewless Ship in the Framework of the Technological Paradigm of the Russian Federation. *Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration*. Volume 1 (115). 2020, pp. 468-474.
4. Ustinov V.V., Zelenkov G.A. Problemy sozdaniya bespilotnykh portovykh buksirov-kantovshchikov i konceptual'nye puti ih resheniya [Problems of creating unmanned port tugboats and conceptual ways to solve them.] *Marine intelligent technologies*. 2019. No. 4 (46) vol. 3, pp. 111-119.
5. Nikolaev N.I., Gritsenko M.V., Gerasidi V.V. Rezul'taty kontrolya vibratsii sudovykh tekhnicheskikh sredstv v ekspluatatsii v sootvetstvii s trebovaniyami pravil RS i zarubezhnykh norm .[Results of vibration control of ship technical means in operation in accordance with the requirements of the RS rules and foreign norms.]*Marine intelligent technologies*. 2019. No. 4-3 (46), pp. 96-103.
6. Samoylenko A.Yu., Turkin V.A., Bushlanov V.P. Formirovanie bazy eksperimental'nykh dannykh dlya issledovaniya rabochnykh ciklov sudovykh dizelej. [Formation of an experimental data base for the study of the working cycles of marine diesel engines]. *Marine intelligent technologies*. 2019. No. 1-2 (43). pp. 59-62.
7. Uriy I. Udin, Anastas L. Boran-Keshishyan, Sergey O. Petrov, Irina V. Glinskaia. Metod matematicheskogo modelirovaniya proizvoditel'nostipropul'sivnojsistemy «Azipod». [Method of mathematical modeling of "Azipod" propulsive system performance]. *Marine Intellectual Technologies*.2018. No. 3 (41) vol. 1., pp. 222-228.
8. Senchenko, V., Lopatina, V., Studenikin, D., Butsanets, A. Technical automation tools for high-precision navigation of sea and river vessels (2021) *Lecture Notes on Civil Engineering*, 130 LNCE. pp. 157-163.
9. Kondratiev S., Astrein, V.V., Boran-Keshishyan, A.L. Predstavlenie precedentov v sudovoj SPPR bezopasnosti sudovozhdeniya. [Presentation precedent in the ship DSS of safe navigation] 2019, *Marine intellectual technologies*. 3-4(46), pp. 147-152
10. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web Conf*. 2022. 134. 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Валерьевич Заслонов, 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. Zaslouov. researcher of the research laboratory "Automation of Navigation», Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93, e-mail: djdf3d@yandex.ru

Анастасия Алексеевна Головина 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.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.04.2022

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.09.2022

Принята к публикации/accepted for publication 27.10.2022

Научная статья

УДК 656.615

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.048>

Автоматизация расчетов подходного канала морского порта

А.Л. Кузнецов¹ thunder1950@yandex.ru, А.В. Кириченко¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

А.Д. Семенов¹ asemyonov054@gmail.com, А.Л. Стариченков² allstar72@yandex.ru

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

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Задача проектирования морского порта во многом сводится к рассмотрению как можно большего количества вариантов размещения порта, конфигурации причальной стенки, состава и количества технологических ресурсов. Поскольку невозможно рассмотреть все сочетания вариантов этих характеристик, решение этой задачи может быть только рациональным, но не оптимальным. В связи с этим, для того, чтобы принять наиболее рациональное решение, необходимо рассмотреть и проанализировать как можно большее количество вариантов. Для того, чтобы увеличить количество рассматриваемых вариантов научное сообщество разрабатывает инструменты поддержки принятия проектных решений, которые либо содержат определенную информацию об определенной сфере проектирования, либо позволяют автоматизировать трудоемкие расчеты. Одной из наиболее сложных и трудоемких задач в этой области является проектирование подходного канала морского порта. В статье показывается, что решение этой задачи на предпроектных этапах, может быть автоматизировано за счет применения волнового алгоритма обхода графа. Этот алгоритм позволяет построить трассу канала на основании данных о глубинах в рассматриваемом регионе с точки зрения разных критериев оптимальности: общего расстояния, стоимости работ и операционной эффективности работы порта. Получаемый с помощью этого метода маршрут может быть скорректирован специалистом вручную с помощью интерактивного интерфейса. Результатом работы представленного в статье метода являются объемы дноуглубительных работ, чертеж плана и разреза подходного канала.

Ключевые слова: проектирование морских портов, морской порт, подходной канал, волновой алгоритм, автоматизация расчетов, дноуглубительные работы

Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д., Стариченков А.Л. Автоматизация расчетов подходного канала морского порта. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 236—241.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.048>

Automatization of seaports approach channel design calculations

Alexander L. Kuznetsov¹ thunder1950@yandex.ru, Alexander V. Kirichenko¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,

Anton D. Semenov¹ asemyonov054@gmail.com, Aleksey L. Starichenkov² allstar72@yandex.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping after admiral S. O. Makarov, ²Saint-Petersburg Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russian Federation

Annotation. The task of seaport design can be represented as a research of as many variants of port position, quay line configuration and sets of technological resources as possible. As far as it is impossible to study all of the possible combinations of these parameters, the optimal solution for the task cannot be found. Therefore, in order to find the most rational decision, it is necessary to develop and analyze as many variants as possible. In order to increase the number of possible variants the scientific society develops the tools that support seaports' design solutions, which can include a certain information about a field of seaports' design or a number of methods that can automate the calculations of the most laboriousness tasks. One of this kind of task is designing of seaports' approach channel. The paper shows that this task can be automated with implementation of Lee algorithm. This algorithm allows to build an approach channel route based on the data on the depths in the region from the different points of view: total distance, building cost and operational effectiveness. The route created with this method can be corrected by the specialist with interactive interface. The results of the suggested method include the volume of dredging and technical drawing of the approach channel.

Key words: seaports design, seaports, approach channel, Lee algorithm, calculations' automatization, dredging operations

For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, Aleksey L. Starichenkov Automatization of seaports' approach channel design calculations. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 236—241.

Введение

Строительство морских портов в защищенных акваториях, позволяющих снизить затраты на гидрозащитные сооружения, часто сопровождается необходимостью создавать и обслуживать

подходные каналы. Под подходным каналом понимается часть акватории морского порта или водных подходов к нему, безопасная в навигационном отношении, обеспеченная средствами навигационного оборудования и предназначенная для следования судов.

Как правило, необходимость создания подходного канала объясняется тем, что выбранное для строительства морского порта место не обладает глубинами, достаточными для подхода к морскому порту расчетных судов. Примерами портов с подходными каналами являются Санкт-Петербург и Калининград (рис. 1).



Рис. 1. Морской канал порта Санкт-Петербурга

Определение местоположения проектируемого морского порта осуществляется на основе сравнения экономической эффективности различных вариантов его расположения. Одним из критериев сравнения является необходимость и стоимость строительства морского канала или гидрозакщитных сооружений. Для определения оптимального месторасположения терминала необходимо сравнить как можно больше различных вариантов. Однако, выполнение соответствующих расчетов подходного канала связано с высокой трудоемкостью, что обычно ограничивает проектировщика рассмотрением одного-двух вариантов. Повысить качество проектных решений позволит метод автоматического проектирования морского канала, описываемый в данной статье.

Основным документом, регламентирующим проектирование подходных каналов в России, является СП 444.1326000.2019 "Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования" [1]. Используемая за рубежом проектировщиками методика проектирования описана в монографиях PIANC "Harbour approach channels design guidelines" и UNCTAD "Port design handbook for developing countries" [2,3].

Согласно данным документам, при проектировании подходного канала необходимо: определить трассу прохождения морского канала; определить габариты канала; определить объем дноуглубительных работ; определить операционную эффективность канала.

Трасса канала, как правило, определяется на основании данных с навигационных карт, данных о предполагаемом расположении морского порта и экспертных знаний инженера. В тоже время, трасса может быть проложена автоматически, с использованием одного из известных алгоритмов обхода графа.

Методы и материалы

В наиболее простой постановке задача трассировки морского канала может быть решена с помощью волнового алгоритма поиска пути на графе [4,5]. В этом алгоритме используется дискретное

пространство, каждая точка которого в начальном состоянии характеризуется возможностью или невозможностью проведения через нее маршрута (рис. 2).

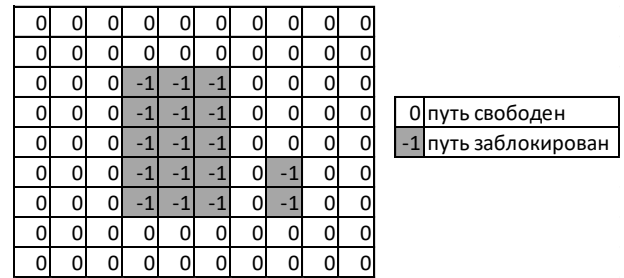


Рис. 2. Пример дискретного пространства

В данном пространстве задаются начальная и конечная точки искомого маршрута (рис. 3).

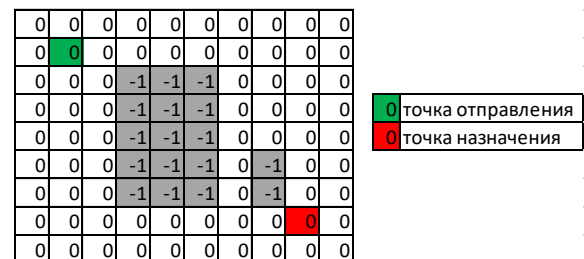


Рис. 3. Начальная и конечная точка пути

Поиск пути осуществляется в два этапа. На первом этапе для точек пространства последовательно строятся метрики расстояния от точки отправления до того момента, пока не будет достигнута конечная точка. На втором этапе осуществляется поиск конкретного варианта пути по рассчитанным расстояниям.

Для расчета расстояния осуществляется последовательный переход между точками пространства. Множество точек на каждом шаге образует подобие распространяющейся «волны», дающей название алгоритму. Распространение волны из каждой точки фронта осуществляется на основании анализа окрестности, включающей соседние точки. В зависимости от выбора версии алгоритма, соседние точки могут определяться как в терминах окрестности фон Неймана, так и в терминах окрестности Мура [6]. Это иллюстрирует рис. 4.

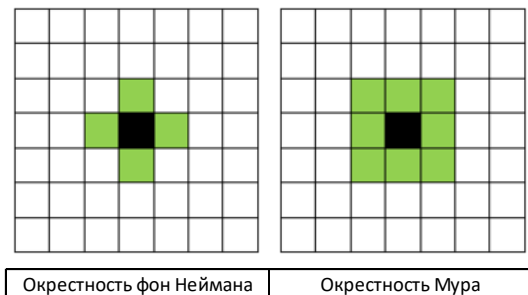


Рис. 4. Пространство Неймана и Мура

На каждом шаге алгоритма определяются точки возможного перехода. В каждую из этих точек записывается количество шагов, которое было

необходимо для осуществления перехода в нее. Пример последовательности перехода (распространения волны) представлен на рис. 5.

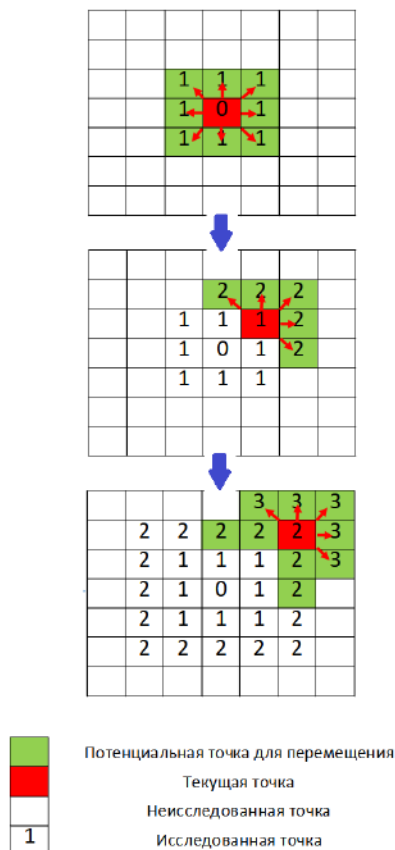


Рис. 5. Пример перехода

Состояние пространства после завершения первого этапа, (достижения целевой точки) представлено на рис. 6.

0	1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	-1	-1	5	6	7	8
2	2	2	-1	-1	-1	6	6	7	8
3	3	3	-1	-1	-1	7	7	7	8
4	4	4	-1	-1	-1	8	-1	8	8
5	5	5	-1	-1	-1	9	-1	9	9
6	6	6	6	7	8	9	10	10	10
7	7	7	7	7	8	9	10	0	0

Рис. 6. Пример оценки количества шагов

Часто этот этап называют «прямым». На втором этапе выполняется поиск обратного пути из достигнутой конечной точки в начальную точку распространения волны. Для этого осуществляется последовательный выбор наименее затратных точек перемещения от точки назначения к точке отправления (рис. 7).

0	1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	-1	-1	5	6	7	8
2	2	2	-1	-1	-1	6	6	7	8
3	3	3	-1	-1	-1	7	7	7	8
4	4	4	-1	-1	-1	8	-1	8	8
5	5	5	-1	-1	-1	9	-1	9	9
6	6	6	6	7	8	9	10	10	10
7	7	7	7	7	8	9	10	0	0

0	1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	-1	-1	5	6	7	8
2	2	2	-1	-1	-1	6	6	7	8
3	3	3	-1	-1	-1	7	7	7	8
4	4	4	-1	-1	-1	8	-1	8	8
5	5	5	-1	-1	-1	9	-1	9	9
6	6	6	6	7	8	9	10	10	10
7	7	7	7	7	8	9	10	0	0

0	1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	-1	-1	5	6	7	8
2	2	2	-1	-1	-1	6	6	7	8
3	3	3	-1	-1	-1	7	7	7	8
4	4	4	-1	-1	-1	8	-1	8	8
5	5	5	-1	-1	-1	9	-1	9	9
6	6	6	6	7	8	9	10	10	10
7	7	7	7	7	8	9	10	0	0

Рис. 7. Поиск пути

Результат работы алгоритма для рассматриваемого примера представлен на рис. 8.

0	1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	-1	-1	5	6	7	8
2	2	2	-1	-1	-1	6	6	7	8
3	3	3	-1	-1	-1	7	7	7	8
4	4	4	-1	-1	-1	8	-1	8	8
5	5	5	-1	-1	-1	9	-1	9	9
6	6	6	6	7	8	9	10	10	10
7	7	7	7	7	8	9	10	0	0

Рис. 8. Пример найденного пути

Результаты

Для иллюстрации работы предлагаемого метода на реальном примере рассмотрим карту, представленную на рис. 9.



Рис. 9. Навигационная карта

Чтобы построить маршрут подходного канала, необходимо указать начальную точку подхода к порту с моря, а также представить навигационную карту в виде полного планарного графа, т.е. собственно дискретного пространства (рис. 10).



Рис. 10. Навигационная карта в виде графа

Для каждой вершины (точки пространства) можно определить стоимость перехода через неё. Например, в качестве стоимости может быть выбрана разница между осадкой расчетного судна и отметкой дна (рис. 11).

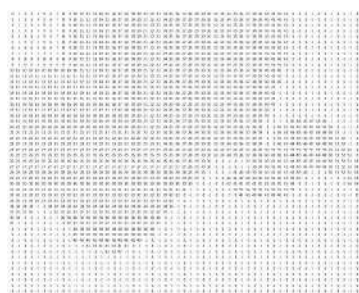


Рис. 11. Стоимость прохода через вершину

Кроме того, в это образование стоимости могут быть внесены характеристики грунта, определяющие трудоемкость его выемки. Введенное пространство

позволяет с помощью волнового алгоритма найти искомый маршрут прохождения подходного канала, являющийся балансом между длиной и трудоемкостью дноуглубления. Результат работы алгоритма представлен на рис. 12.



Рис. 12. Пример построения маршрута

Для оценки объема дноуглубительных работ далее необходимо привлечь габариты подходного канала, которые определяются согласно указанному СП 444.1326000.2019 “Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования”. Основными габаритами канала являются ширина и глубина, которые рассчитываются в зависимости от расчетного судна. На рис. 13 представлен общий вид поперечного сечения морского канала.

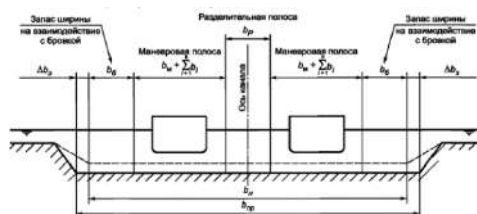


Рис. 13. Общий вид сечения морского канала

В случае, если для расчетного судна неизвестны его размерения, эти параметры могут быть получены с помощью эмпирических правил определения размерений судов по дедвейту [7].

Для предварительного расчета объема дноуглубительных работ предлагается использовать следующий метод: поскольку известна трасса морского канала и глубины на всем её протяжении, может быть построен профиль морского канала, где по горизонтали будет представлена длина участка, а по вертикали его глубина. На профиле так же можно представить глубину канала (рис. 14).

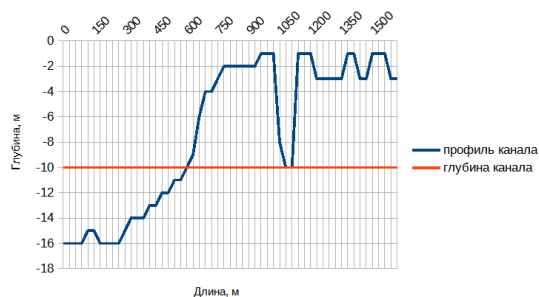


Рис. 14. Профиль морского канала

На этом упрощенном рисунке глубины вдоль всего профиля считаются равными, и дноуглубительные работы необходимо выполнять там, где естественные глубины недостаточны. Общий объем дноуглубительных работ определяется профилем канала и совокупной длиной участков, требующих дноуглубления.

Обсуждение

Представленный алгоритм позволяет определить наиболее короткий путь на карте. Однако, в представленном виде этот путь может быть не оптимальным как с экономической, так и с операционной точек зрения. Устранение данного противоречия будет выполнено в последующих работах. В текущей конфигурации программы маршрут может быть улучшен специалистом с помощью интерактивного интерфейса, в котором можно изменять координаты ключевых точек и изменять шаг алгоритма (рис. 15).

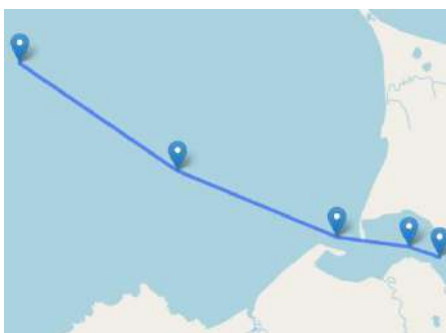


Рис. 15. Интерфейс для изменения маршрута

Результаты, полученные с помощью описанного выше алгоритма и дополненные специалистом, формируются в виде отчета с описанием логики

расчета и полученными объемами работ, а также в виде чертежа (рис. 16).



Рис. 16. Пример плана морского канала

Выводы

1. Автоматизация расчетов по проектированию подходного канала может быть реализована с помощью волнового алгоритма обхода графа.
2. Реализация представленного в работе алгоритма позволит повысить скорость выполнения предпроектных изысканий при проектировании морских портов, что позволит рассматривать большее количество вариантов и, как следствие, принимать более рациональные решения уже на первых этапах проектирования.
3. Представленный в работе алгоритм должен быть дополнен выбором критерия оптимальности и картографическими данными о прибрежной зоне страны.
4. На следующем этапе анализа построенного варианта морского канала может быть выполнено имитационное моделирование работы порта с учетом движения судов по подходному каналу.

Литература

1. СП 444.1326000.2019 "Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования".
2. Permanent International Association of Navigation Congresses et al. Approach channels: A guide for design. – PIANC, 1997. – V. 2.
3. "Port design. A handbook for planners in developing countries" – UNCTAD, Geneva, 1985, p. 227.
4. Lee C. Y. An algorithm for path connections and its applications //IRE transactions on electronic computers. – 1961. – № 3. – С. 346-365.
5. Rubin F. The Lee path connection algorithm //IEEE Transactions on computers. – 1974. – V. 100. – № 9. – P. 907-914.
6. Sharma P., Diwakar M., Lal N. Edge detection using Moore neighborhood //International Journal of Computer Applications. – 2013. – Т. 61. – № 3.
7. Купцов Н. В. Исследование актуальных размерений балкеров для технологического проектирования морских портов / Николай Владимирович Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

References

1. SP 444.1326000.2019 «Normy proektirovaniya morskikh kanalov, farvaterov i zon manevrirovaniya» [The rules of sea channels, waterways and maneuvering area design]. [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/563687338> (data obrascheniya: 03.09.2022).
2. Permanent International Association of Navigation Congresses et al. Approach channels: A guide for design. – PIANC, 1997. – V. 2.
3. "Port design. A handbook for planners in developing countries" – UNCTAD, Geneva, 1985, p. 227.
4. Lee C. Y. An algorithm for path connections and its applications //IRE transactions on electronic computers. – 1961. – № 3. – С. 346-365.
5. Rubin F. The Lee path connection algorithm //IEEE Transactions on computers. – 1974. – V. 100. – № 9. – P. 907-914.

6. Sharma P., Diwakar M., Lal N. Edge detection using Moore neighborhood //International Journal of Computer Applications. – 2013. – Т. 61. – №. 3.
7. Kuptsov N. V. Issledovanie aktual'nyh razmerenij balkeroi dlja tehnologicheskogo proektirovanija morskih portov [The review of relevant bulkers' dimensions for the purposes of seports' technological design] / Nikolaj Vladimirovich Kuptsov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. - 2017. - №2(42). - С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Львович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Александр Викторович Кириченко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: KirichenkoV@gumrf.ru

Антон Денисович Семенов, аспирант, научный руководитель – Кузнецов Александр Львович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Алексей Леонидович Стариченков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5; e-mail: allstar72@yandex.ru

Aleksandr L. Kuznetsov, professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Anton D. Semenov, postgraduate, scientific advisor – Kuznetsov Aleksandr L., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Alexey L. Starichenkov, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: allstar72@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК:629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.049>

Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов

И.М. Данцевич¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, В.Ф. Лубенцов² vf.lubentsov@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, ²Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В статье рассматривается интерполяция гидродинамических коэффициентов в зависимости от угла атаки и скольжения при реализации регуляторов движительно - рулевого комплекса телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) при типе движения в продольно-поперечной плоскости. Горизонтальное перемещение и развороты ТНПА реализуются четырьмя электрическими двигателями, размещёнными в плане прямоугольной платформы. Вертикальное управление обеспечивается тремя двигателями вертикального управления.

Комбинация упоров двигателей в продольно-поперечной и вертикальной плоскости позволяет реализовывать перемещение, динамическое позиционирование и компенсацию движения, вызванную использованием комплекса рабочих инструментов. Учитывая, что ТНПА имеет практически нулевую плавучесть, обосновано требование реализации удержания позиции при выполнении рабочих операций.

Математическое ожидание отсчётов координат ТНПА, реализованное в виде матричного оператора с формированием оператора рабочей функции управления, корректируется в канале решающей обратной связи по результатам коэффициентов сопротивления, определяемых на стадии аэродинамического эксперимента с моделями ТНПА.

Научной новизной является то, что матричные операторы гидродинамических характеристик по результатам двулинейной интерполяции позволяют реализовать табличный тип управления в канале решающей обратной связи, формирующие скомпенсированный вид оператора математического ожидания скоростей и моментов, формируемых по рабочей (целевой) функции управления.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они позволяют реализовывать программные функции управления телеуправляемыми необитаемыми аппаратами, обеспечивая перемещения в продольно-поперечной плоскости, динамическом позиционировании и вспомогательные функции при работе бортовым комплексом инструментов.

Ключевые слова: аэродинамический эксперимент, гидродинамические коэффициенты, двигатель-рулевой комплекс (ДРК), двулинейная интерполяция, динамическое позиционирование, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, рабочая функция управления, решающая обратная связь.

Для цитирования: Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 242—250.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.049>

Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in operating functions management remotely operated underwater vehicle

Igor M. Dantsevich¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, Valery F. Lubentsov² vf.lubentsov@yandex.ru

¹Admiral Ushakov maritime state university, ²Kuban state technological university

Abstract. The article considers the interpolation of hydrodynamic coefficients in dependence of the attack angle and sliding while implementing the controllers of the propulsion and steering complex of remotely controlled uninhabited vehicles with the type of movement in the longitudinal-transverse plane. Horizontal movement and U-turns of the remotely operated underwater vehicle (ROUV) are realized by four electric thrusters placed in the plan of a rectangular platform. Vertical control is provided by three vertical control thrusters.

The combination of propellers' stops in the longitudinal-transverse and vertical planes allows for the implementation of displacement, dynamic positioning and motion compensation caused by means of working tools set. The device itself has almost zero buoyancy and requires the implementation of position retention in the process of working operations. The mathematical expectation of the readings of the ROUV coordinates, implemented in the form of a matrix operator with the formation of the operator of the working control function, is corrected in the decisive feedback channel based on the results of the drag coefficients determined at the stage of the aerodynamic experiment with ROUV models.

Matrix operators of hydrodynamic characteristics based on the results of two-line interpolation make it possible to implement a tabular type of control in the channel of decisive feedback, forming a compensated form of the operator of mathematical expectation of velocities and moments formed by the working (target) control function.

The results obtained make it possible to implement software functions for controlling ROUVs moving in the longitudinal-transverse plane, dynamic positioning, auxiliary functions when working with an onboard set of tools.

Keywords: aerodynamic experiment, hydrodynamic coefficients, propulsion and steering complex (DRC), two-line interpolation, dynamic positioning, remote-controlled uninhabited underwater vehicles Engine-steering system (ESS), remote operation vehicle (ROV), mathematical expectation, standard deviation, operating control function, decisive feedback

For citation: Igor M. Dantsevich, Valery F. Lubentsov, Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in operating functions management remotely operated underwater vehicle, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 242—250.

Введение

Применение ТНПА имеет свои особенности, одна из желаемых достижимых характеристик являются устойчивость движения по выбранной траектории.

Система управления ТНПА является принципиально нелинейной, при которой могут применяться методы вычисления матричных операторов. Вопросы управления движением по различным типам траекторий и заданных вариантов динамики успешно решаются путём обработки данных аэродинамических экспериментов и линеаризацией механических характеристик приводов [1].

Однако важной нерешенной задачей остается задача компенсации динамики ТНПА при работе манипуляторов и рабочих инструментов. Ее решение требует построения регуляторов динамики при нелинейностях, вызванными работой манипуляторов, в реальном масштабе времени. При этом нелинейности желательно задавать аналитически, исходя из алгоритмов задач, выполняемых манипуляторами [2-3]. Выходными функциями являются функции компенсации упоров движителей ТНПА.

Отметим, что целевая функция, построенная по желаемым критериям идентификации параметров ТНПА при нелинейной динамике, должна реализовываться за одну итерацию. Желаемыми критериями идентификации считаем критерий допустимых (комфортных) реакций пилота ТНПА на параметры динамики [4].

Актуальность исследования определяется численным моделированием динамики ТНПА с построением функций сопротивления его проекций на связанные оси движения по данным аэротрубного эксперимента и интерполяции к решению задачи идентификации типа динамики. Идентификация динамики численными методами позволяет использовать табличные значения функций при построении пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора движителей движительно-ролевого комплекса ТНПА [5].

1. Математическая модель движения ТНПА в горизонтальной плоскости

Перемещение ТНПА в горизонтальной плоскости обеспечивается набором параметров перекрёстного управления: $F(P_x P_y P_z M_x M_y M_z)^T$, где $P_{x,y,z} = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_{Y1}, P_{Y2}, P_{Y3})^T$ – силы упоров маршевых двигателей ТНПА [6-8].

Обычно $\forall P_{ij}, \exists b_{ij}, b = \{1,2,3,4\}$, учитывая нелинейную систему запишем в виде полинома

$$\sum_{i+j+k=0}^n a_{ij}(t)C_x^i, C_y^j, C_z^k + F(x(t), y(t), z(t)) = \sum_{i+j=0}^m b_{ij}(t)C_x^i, C_y^j, C_z^k, \tag{1}$$

где C_x^i, C_y^j, C_z^k – коэффициенты сопротивления движению ТНПА в зависимости от угла атаки α и скольжения β , в общем случае:

$$f(\alpha, \beta) = \sum_{i+j=0}^n a_{i,j} C_x^i, C_y^j, C_z^k. \tag{2}$$

Линеаризацию уравнения (2) выполним интегрированием ряда по малому значению τ

$$k_{x,y,z}(t, \tau) = 1(t - \tau) \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m}{(n)!} \frac{d^m}{d\tau^m} [a_m(\tau)(t - \tau)^n],$$

$$k_f(t, \tau) = 1(t - \tau) \frac{1}{n!} (t - \tau)^n, \tag{3}$$

вида

$$\int_0^T k_{x,y,z}(t, \tau) x(\tau), y(\tau), z(\tau) d\tau + \int_0^T k_f(t, \tau) F(x(t), y(t), z(t)) d\tau = 0. \tag{4}$$

Вектор пространства состояний ТНПА $\{\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}\}$, представим заданным по ортонормированному базису [9]:

$$\vec{S}(t) = \{s_i(t) : i = \overline{1, \infty}, t \in [0, T]\}, \tag{5}$$

$$S = F^T(t) C_{x,y,z},$$

$$F(x(t), y(t), z(t)) = F^T(t) C_{x,y,z}^f,$$

$$k_{x,y,z}(t, \tau) = F^T(t) A_{x,y,z} F(\tau),$$

$$k_f(t, \tau) = F^T(t) A^f F(\tau). \tag{6}$$

Матрица возмущений формируется по идентификации $F(t) = [s_1(t) s_2(t) \dots s_N(t)]^T$ с коэффициентами

$$C_{x,y,z} = \begin{bmatrix} c_x & c_{x,y} & c_{x,z} \\ c_{y,x} & c_y & c_{y,z} \\ c_{z,x} & c_{z,y} & c_z \end{bmatrix},$$

$$c_x = \int_0^T x(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_y = \int_0^T y(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_z = \int_0^T z(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_{x,y,z}^f = \int_0^T F(x(t), y(t), z(t)) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N. \tag{7}$$

Набор коэффициентов состояний системы определяем матрицей A

$$\begin{cases} A_{x,y,z} = \left\{ \int_0^T \int_0^t k_{x,y,z}(t, \tau) s_{i,j}(t, \tau) dt d\tau \right\}_{i,j=1}^N \\ A^f = \left\{ \int_0^T \int_0^t k_f(t, \tau) s_{i,j}(t, \tau) dt d\tau \right\}_{i,j=1}^N \\ A^\varepsilon = \{a_{i,j}\}_{i,j=1}^N. \end{cases} \tag{8}$$

Уравнение (1) в матричной форме

$$[A][C] + [A^f][C^f] = [F]. \tag{9}$$

Спектр матрицы коэффициентов малых приращений

$$[C^x] = [A^\varepsilon][C]. \quad (10)$$

Линеаризацию уравнения (2) выполним из предположения программного движения по малым приращениям координат

$$\begin{cases} X(\alpha, \beta) \cong X_0 + X^\alpha \Delta\alpha + X^\beta \Delta\beta + \chi(\alpha, \beta) \\ Y(\alpha) \cong Y_0 + Y^\alpha \Delta\alpha + \chi(\alpha) \\ Z(\beta) \cong Z_0 + Z^\beta \Delta\beta + \chi(\beta) \\ M_x(\beta, \omega_x) \cong M_{x0} + M_{x0}^\beta \Delta\beta + M_{x0}^{\omega_x} \Delta\omega_x + \chi(\beta, \omega_x) \\ M_y(\beta, \omega_y) \cong M_{y0} + M_{y0}^\beta \Delta\beta + M_{y0}^{\omega_y} \Delta\omega_y + \chi(\beta, \omega_y) \\ M_z(\alpha, \omega_z) \cong M_{z0} + M_{z0}^\alpha \Delta\alpha + M_{z0}^{\omega_z} \Delta\omega_z + \chi(\alpha, \omega_z). \end{cases} \quad (11)$$

В соответствие с формулой (9) выполним вычисление коэффициентов (11) по алгоритму:

- разложение исходного сигнала управления от манипуляторов пилота или автопилота ТНПА $S = \{V_x, V_y, V_z\}$ в полифазном фильтре с разным временем интегрирования;
- вычисления среднеквадратического значения по декомпозициям по правилу $0,707 \leq f^2 \leq 1$;
- трешолдинг по выбранным коэффициентам разложения сигнала в полифазном фильтре A^f ;
- восстановление C^x на каждом шаге по функции времени τ .

Структура сигнала управления получит некоторую дискретность по минимуму ошибки управления A^ε в спектре матрицы управления $C_{x,y,z}^f$.

Идентификация системы управления выполняется по наборам решений систем уравнений движения морских подвижных объектов с учётом матриц присоединённых масс Λ , скоростей V , тогда полная энергия движения [10-11]

$$[E] = 0,5[\Lambda][V^2] - 0,5\rho[C][S][V^2] \quad (12)$$

где $[\Lambda][V^2]$ – произведение матриц присоединённых масс и скоростей; $0,5\rho[C][S][V^2]$ – обобщённый вектор сопротивления движению, произведение матриц сопротивления $[C]$, площади лобового сопротивления движению объекта $[S]$ и квадрата скоростей $[V^2]$.

Если рассматривать такой аспект, как движение в одной из плоскостей, а чаще рассматривают "разделённые" по плоскостям движения, то совместное решение для динамики ТНПА потребует «совмещения» кинематических параметров движения [12-13].

Связь вращательного и поступательного движения обеспечивается уравнениями связи для вращательного движения

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \phi_i \\ \psi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{i-1} \\ \phi_{i-1} \\ \psi_{i-1} \end{bmatrix} + B_\omega^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{xi} \\ \omega_{yi} \\ \omega_{zi} \end{bmatrix} \cdot \Delta t, \quad (13)$$

где Δt – шаг решения, оператор поворота

$$B_\omega = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Уравнения связи поступательного и вращательного движения имеют вид:

$$\begin{bmatrix} x_{gi} \\ y_{gi} \\ z_{gi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{gi-1} \\ y_{gi-1} \\ z_{gi-1} \end{bmatrix} + B_v^{-1} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \\ v_{zi} \end{bmatrix} \cdot \Delta t, \quad (15)$$

где матрица поворотов углов Эйлера B_v^{-1} , x_{gi}, y_{gi}, z_{gi} – координаты центра тяжести ТНПА; θ_i, ϕ_i, ψ_i – углы Эйлера полусвязанной системы координат.

2. Двухлинейная интерполяция гидродинамических параметров ТНПА

Исследование возможных способов интерполяции допускают следующие упрощения задачи [14-15]:

– гидродинамические переменные, вызванные плотностью воды, солёностью не могут изменяться радикально, как правило, это достаточно статичный процесс;

– сама гидродинамика привязных аппаратов чаще всего предусматривает плохобтекаемые формы, это делается с целью получения статической устойчивости аппаратов (сохранения его положения в пространстве по центровочным характеристикам);

– перемещения ТНПА в вертикальной плоскости осуществляется в режимах формирования зоны допоска, обычно задача управления рассматривается в области горизонтального перемещения ТНПА и изменения угла атаки аппарата, вызванные необходимостью более эффективного применения инструментов.

Эксперимент в аэродинамической трубе проводился с целью определения гидродинамических коэффициентов сил C_x, C_y, C_z и моментов m_x, m_y, m_z , в набегающем потоке воздуха соответствующего скорости движения ТНПА в воде со скоростью 1 м/с. Измерения производились при различных углах атаки ТНПА – α , который изменялся в пределах $-30^\circ: 3^\circ: +30^\circ$ и скольжения – β , пределы изменения которого составили $-18^\circ: 3^\circ: +18^\circ$, рисунок 1.

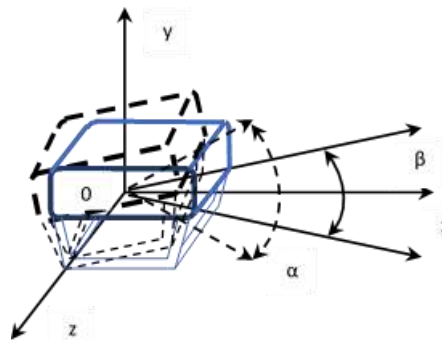


Рис. 1 Связанная система координат исследования динамики телеуправляемого подводного аппарата (ТНПА)

Движение с учётом изменения угла атаки и скольжения учтём из соображений интерполированных коэффициентов сил C_x, C_y, C_z и моментов m_x, m_y, m_z .

Реализация программно-управляемого движения должна учитывать изменения гидромеханических переменных при выполнении поворотов в движении.

Матрица наблюдаемых параметров динамики ТНПА должна учитывать возможные изменения коэффициентов.

С учётом калибровки системы движителей ТНПА удалось получить удовлетворительные внешние характеристики, что в свою очередь позволяет реализовать систему управления движителями на

дискретном пропорционально-интегральном регуляторе. В то же время при формировании в канале обратной связи сигналов наблюдения динамики необходимо использовать зависимость изменения перехода гидродинамических переменных в функции двух переменных $f(\alpha, \beta)$.

Применение многочленов Ньютона или Лагранжа требует расположения узлов интерполяции в виде параллелепипеда или тетраэдра в случае трёхмерной интерполяции, что при реализации произвольной функции управления реализовать сложно.

Для набора параметров $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\alpha, \beta)$, где α – угол атаки, β – угол скольжения (поворота относительно продольной оси аппарата) требуется выполнить аппроксимацию полиномом степени n .

Аппроксимация двух случайных функций $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\alpha)$ и $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\beta)$, к условиям азотрубного эксперимента накладывает условия регулярного расположения точек аппроксимации, что позволяет свести задачу интерполяции с использованием интерполяционной структуры в виде тетраэдра.

Для набора экспериментальных данных, определим полином следующего вида:

$$f(\alpha, \beta) = \sum_{i+j+k=0}^n a_{i,j,k} C_x^i C_y^j C_z^k m_x^i m_y^j m_z^k, \quad (16)$$

где i, j, k – ортогональный базис, а коэффициенты a_n определены из условий $n = \overline{1, N}$.

Функция $f(\alpha, \beta)$ известна в точках $-\alpha^0: n^0: +\alpha^0$ и $-\beta^0: \beta^0: +\beta^0$, значения $C_x^i, C_y^j, C_z^k, m_x^i, m_y^j, m_z^k$ располагаются произвольно.

Требуется построить полином от n переменных, принимающих заданные значения $C_x^i, C_y^j, C_z^k, m_x^i, m_y^j, m_z^k$ в узлах интерполяции. Рассмотрим построение поэтапно.

1. Интерполяционный полином Лагранжа для двух переменных

$$\alpha \in [\alpha_{-n}, \alpha_{+n}] \text{ и } \beta \in [\beta_{-k}, \beta_{+k}]:$$

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{N=0}^N \sum_{K=0}^K f_{nk} l_{nk}(\alpha, \beta), \quad (17)$$

где $l_{nk}(\alpha, \beta) = 1, l_{nk}(\alpha, \beta) = 0, \forall \alpha \neq \beta \vee \beta \neq \alpha;$

$$l_{nk}(\alpha, \beta) = \prod_{i \neq n}^N \prod_{j \neq k}^K \frac{(\alpha - \alpha_i)(\beta - \beta_j)}{(\alpha_n - \alpha_i)(\beta_k - \beta_j)}. \quad (18)$$

Линейная комбинация $l_{nk}(\alpha, \beta) = 1$ не может иметь степени выше $n \times k$.

2. $\forall C_i, m_j \in D$ значения $f(\alpha_i, \beta_j) = C_{ij}$ могут быть интерполированы по $C_x^i, C_y^j, C_z^k, m_x^i, m_y^j, m_z^k$ если последние есть значения в вершинах треугольника.

3. Значения функции в вершинах треугольника $C_x^i, C_y^j, C_z^k, m_x^i, m_y^j, m_z^k$, определяются из условия $f(\alpha, \beta) \approx F(\alpha, \beta) = a\alpha + b\beta + c$, коэффициенты a, b, c соответственно

$$\begin{aligned} a\alpha_{C_x} + b\beta_{C_x} + c &= C_x, \\ a\alpha_{C_y} + b\beta_{C_y} + c &= C_y, \\ a\alpha_{C_z} + b\beta_{C_z} + c &= C_z, \\ a\alpha_{m_x} + b\beta_{m_x} + c &= m_x, \\ a\alpha_{m_y} + b\beta_{m_y} + c &= m_y, \\ a\alpha_{m_z} + b\beta_{m_z} + c &= m_z. \end{aligned} \quad (19)$$

Координаты вершин

$$\{\alpha_{C_x}, \beta_{C_x}\}, \{\alpha_{C_y}, \beta_{C_y}\}, \{\alpha_{C_z}, \beta_{C_z}\}, \{\alpha_{m_x}, \beta_{m_x}\}, \{\alpha_{m_y}, \beta_{m_y}\}, \{\alpha_{m_z}, \beta_{m_z}\}.$$

Билинейную форму вида

$$f(\alpha, \beta) = \sum_{i+j+k=0}^N \sum_{i+j+k=0}^K a_{nk}^{i,j,k} C_x^i C_y^j C_z^k m_x^i m_y^j m_z^k, \quad (20)$$

запишем в виде определителя $\Delta f_{\alpha, \beta}$.

Раскладывая определитель по элементам первого столбца, получим

$$\sum_{k=0}^N f(\alpha_k) A_k = 0, \quad (21)$$

где A_k – алгебраическое дополнение $f(\alpha_k)$.

Для двух ортогональных интерполяционных многочленов получаем:

$$f(\alpha_0) = \pm \sum_{k=1}^N f(\alpha_k) A_k / A_0, \quad (22)$$

$$f(\beta_0) = \pm \sum_{k=1}^N f(\beta_k) A_k / A_0.$$

Диагональные коэффициенты $a_{nk}^{i,j,k}$ размещаются в столбцах определителя по правилу a_{000} в первом столбце, a_{010} – во втором столбце, a_{100} – в третьем. В точках интерполяции необходимо выполнение условия $A_0 \neq 0$. Число элементов полинома возрастает в зависимости от степени полинома, что создаёт трудности при интерполяции полиномами высокой степени.

Интерполяцию гидродинамических параметров $C_x^i, C_y^j, C_z^k, m_x^i, m_y^j, m_z^k$ рассмотрим как задачу приближения к некоторой искомой точке $C_{x0}^i, C_{y0}^j, C_{z0}^k, m_{x0}^i, m_{y0}^j, m_{z0}^k$ слева и справа от известных точек в ортогональных векторах α и β .

Аппроксимацию между набором точек, полученных в ходе азотрубного эксперимента, выполним отрезками ряда Фурье, в системе ортогональных полиномов $f(\alpha, \beta)$.

Недостатком рассмотренного подхода является необходимость раз переписывать определитель (10) в зависимости от изменения углов атаки и скольжения.

Ещё одним препятствием на пути метода является совпадение сетки преобразования, иначе говоря, преобразование координат возможно при $\alpha \neq \beta$.

Применим к наборам коэффициентов $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\alpha, \beta)$ ортогонализацию Грама-Шмидта.

Для набора $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\alpha)$ математическое ожидание имеет вид

$$M_{C_x, y, z, m_x, y, z} = \begin{vmatrix} C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z & C_x m_x & C_x m_y & C_x m_z \\ C_y C_x & C_y^2 & C_y C_z & C_y m_x & C_y m_y & C_y m_z \\ C_z C_x & C_z C_y & C_z^2 & C_z m_x & C_z m_y & C_z m_z \\ m_x C_x & m_x C_y & m_x C_z & m_x^2 & m_x m_y & m_x m_z \\ m_y C_x & m_y C_y & m_y C_z & m_y m_x & m_y^2 & m_y m_z \\ m_z C_x & m_z C_y & m_z C_z & m_z m_x & m_z m_y & m_z^2 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Учитывая зависимости гидродинамических переменных от угла скольжения, рассмотрим многомерную матрицу (13) в виде

$$M_{C_x, y, z, m_x, y, z}^{\alpha, \beta} = \begin{vmatrix} C_{x,y,z}^{\alpha} & m_{x,y,z}^{\alpha} & C_{x,y,z}^{\beta} & m_{x,y,z}^{\beta} \\ C_{x,y,z}^{\alpha, \beta} & m_{x,y,z}^{\alpha, \beta} & C_{x,y,z}^{\beta} & m_{x,y,z}^{\beta} \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Совокупность элементов (24) при $1 \leq \alpha \leq n$ и $1 \leq \beta \leq n$ образуют простые сечения соответственно $C_{x,y,z}^\alpha$ и $C_{x,y,z}^\beta$ соответственно.

Совокупность элементов (24) при $1 \leq \alpha \neq \beta \leq p, \forall p \in n, m$ образует двумерное сечение ориентации $C_{x,y,z}^{\alpha,\beta}, m_{x,y,z}^{\alpha,\beta}$ $p-2$ мерной матрицей порядка $n \times m$. Строго говоря, число транспонированных матриц, образующих двумерные сечения, может составлять $p!$. Однако в силу симметричности ТНПА, а также совпадения распределений, выявленных в ходе аэротрубного эксперимента, можно сократить размерность сечений (24). Полезным будет также исключить совпадения узлов сетки при анализе пространственного движения ТНПА.

3. Минимум параметра адаптации рабочей функции управления

Набор параметров (14) в зависимости от сечения матрицы наблюдаемых коэффициентов определяется желаемым пространственным положением подводного аппарата. Конечным итогом анализа рабочей функции управления определим рабочие точки характеристик привода движителей, реализованные в виде значений коэффициентов сопротивления движению и вращательной динамики [16-18].

Рабочую функцию управления представим в виде

$$\nabla \frac{\partial \xi}{\partial S} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial s_0} \quad \frac{\partial \xi}{\partial s_1} \quad \dots \quad \frac{\partial \xi}{\partial s_L} \right]^T, \quad (25)$$

где $\nabla(\xi)$ – градиент функции среднеквадратического отклонения (СКО) от математического ожидания M , вектора параметра S полагая $\|\xi\| = 0 \forall S = S^*$;

$$\nabla = 0 = 2MS^* - 2R, \quad (26)$$

оптимальный

$$S^* = M^{-1}R. \quad (27)$$

Тогда фиксируя СКО как

$$\xi = M[y_k^2] = M[\lambda_k^2] + S^TMS - 2R^TS, \quad (28)$$

для набора параметров

$$\xi_{min} = M[y_k^2] + S^{*T}MS^* - 2R^TS^* = M[y_k^2] + [P^{-1}R]^T \cdot P \cdot P^{-1}R - 2R^TP^{-1}P \cdot R, \quad (29)$$

где

$$P = M[X_i X_i^T] = \begin{bmatrix} x_{0i}^2 & x_{0i}x_{1i} & x_{0i}x_{2i} & \dots & x_{0i}x_{ki} \\ x_{1i}x_{0i} & x_{1i}^2 & x_{1i}x_{2i} & \dots & x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{ki}x_{0i} & x_{ki}x_{1i} & x_{ki}x_{2i} & \dots & x_{ki}^2 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

соответствует многомерной корреляционной матрице (24).

В зависимости от угла атаки и скольжения набор коэффициентов однозначно соответствует пространственному положению ТНПА.

Аэротрубный эксперимент проводился по геометрически подобной копии ТНПА, выполненной в масштабе 1:5.

Размеры рассмотренной модели:

- характерный линейный размер при вычислении момента M_z (длина модели) – $l_m = 0,4\text{м}$;
- характерный линейный размер при вычислении моментов M_x и M_y (ширина модели) – $0,25\text{м}$;
- характерная площадь $S_m = 0,071\text{м}^2$ (площадь поперечного сечения модели ТНПА).

Скорость потока в трубе – 28 м/с , что соответствует скорости аппарата в воде – $1,0 \dots 1,5\text{ м/с}$.

Результаты представлены в скоростной (поточной) системе координат с началом в центре масс аппарата. Габаритные параметры и общий вид модели приведены на рисунке 2 и фото – рисунке 3.

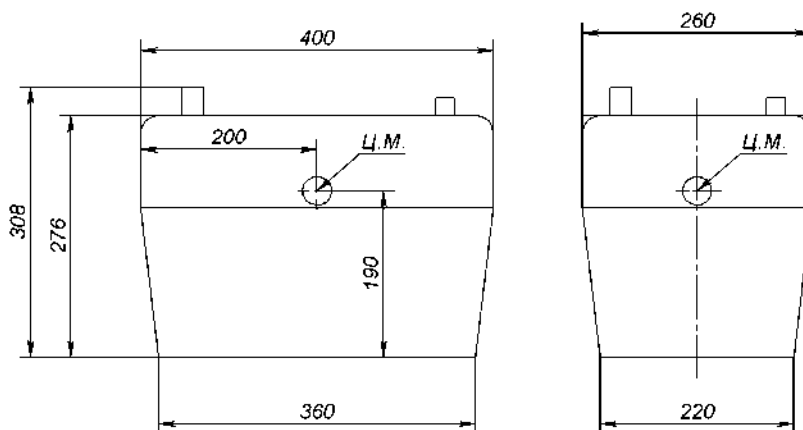


Рис. 2 Габаритный чертёж модели ТНПА для исследования в аэродинамической трубе



Рис. 3 Модель ТНПА для исследования в аэродинамической трубе

Как видно из рисунка 4, график представляет собой квадратичную функцию, допускающую аппроксимацию полиномом второй степени.

Интерполяция данных аэротрубного эксперимента, приведённая на рисунках 4 и 5, определяет зависимости коэффициентов сопротивления скорости потока C_x, C_y, C_z и моментов сопротивления $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ от угла атаки α и угла скольжения β

$$\begin{aligned} C_x(\alpha) &= 0,0034\alpha^2 - 0,0669\alpha + 1,1321, \\ C_y(\alpha) &= -0,0013\alpha^2 + 0,0588\alpha - 0,365, \\ C_z(\alpha) &= 0,0002\alpha^2 - 0,0026\alpha - 0,0114, \\ \omega_x(\alpha) &= -0,0001\alpha^2 + 0,0021\alpha - 0,0053, \\ \omega_y(\alpha) &= -0,0005\alpha^2 + 0,0155\alpha - 0,1933, \end{aligned}$$

$$\omega_z(\alpha) = -0,0009\alpha^2 + 0,0146\alpha - 0,0462. \quad (31)$$

Полученные функции коэффициентов сопротивления и моментов сопротивления позволяют определить минимум функции ошибки системы управления, которую примем равной первому порядку малости.

Соответственно, для угла скольжения (рисунок 4) имеем

$$\begin{aligned} C_x(\beta) &= 0,0023\beta^2 - 0,03\beta + 0,8555, \\ C_y(\beta) &= 0,0003\beta^2 - 0,0016\beta + 0,1344, \\ C_z(\beta) &= -0,0007\beta^2 - 0,0719\beta + 0,542, \\ \omega_x(\beta) &= -0,3 \times 10^{-4}\beta^2 + 0,0146\beta - 0,091, \\ \omega_y(\beta) &= 0,0001\beta^2 - 0,0079\beta + 0,0485, \\ \omega_z(\beta) &= -0,0003\beta^2 + 0,0022\beta - 0,1044. \end{aligned} \quad (32)$$

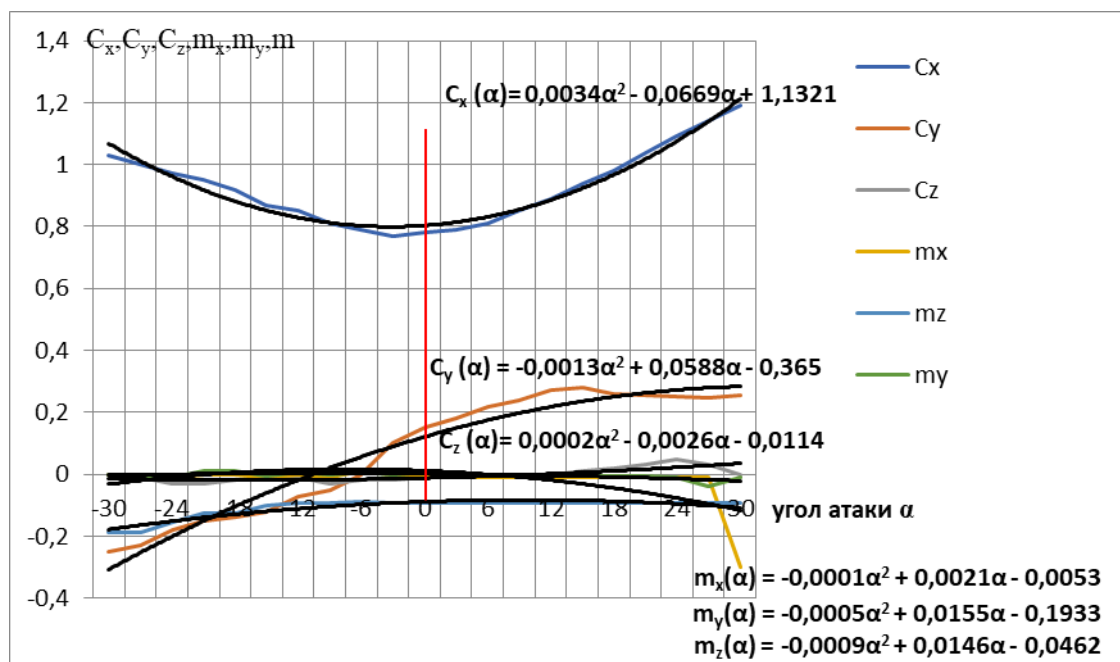


Рис. 4 Интерполяция коэффициентов сопротивления и моментов сопротивления ТНПА при изменении угла атаки

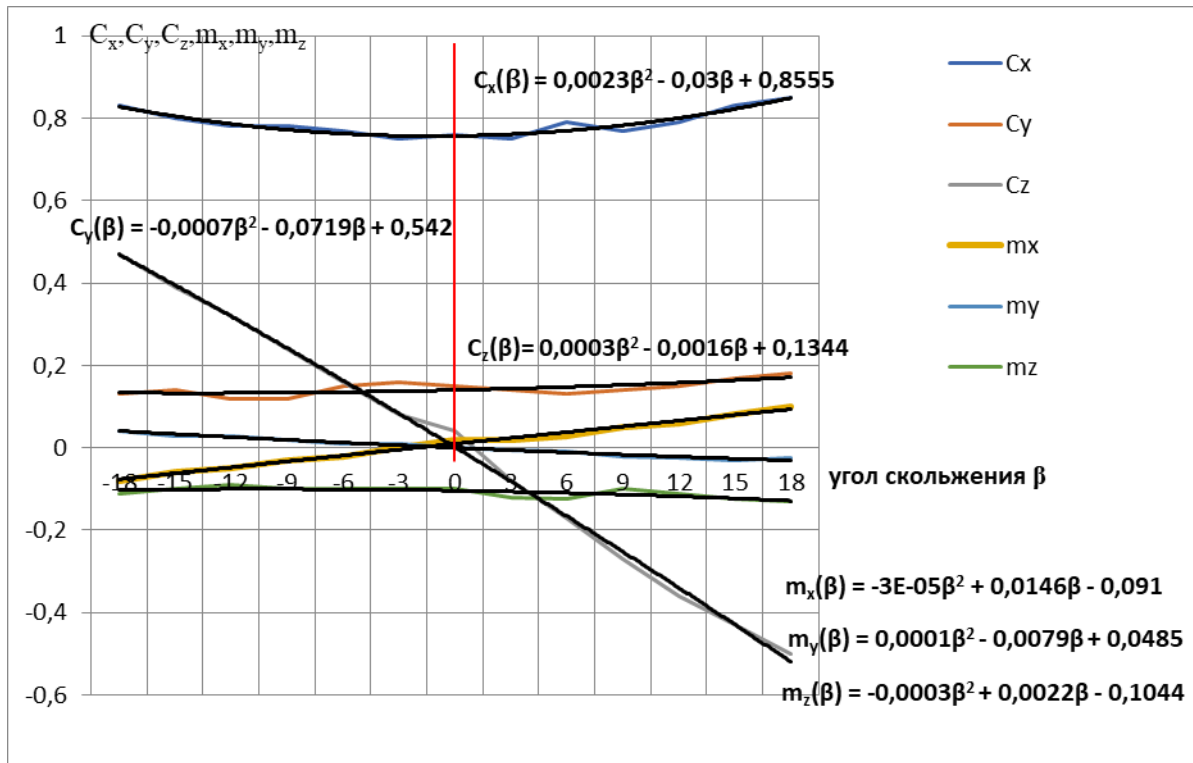


Рис. 5 Интерполяция коэффициентов сопротивления и моментов сопротивления от угла скольжения

Для рассматриваемой модели, учитывая симметрию ТНПА относительно продольной и поперечной осей и условия, создаваемые присоединёнными массами воды для продольно-поперечной плоскости движения ТНПА, будем иметь

$$\begin{aligned} X &= -160 \frac{dv_x(t)}{dt} - 540v_z \cdot \omega_y + 1800v_y \cdot \omega_z - 270(v_x + 0,5\omega_x) \cdot |v_x + 0,5\omega_x|, \\ Z &= -540 \frac{dv_z(t)}{dt} - 1800v_y \cdot \omega_x + 160v_x \cdot \omega_y - 400(v_z - 0,5\omega_x) \cdot |v_z - 0,5\omega_x|, \\ M_y &= -120 \frac{d\omega_y(t)}{dt} + 550v_y \cdot \omega_z - 500v_x \cdot \omega_x + 300v_x \cdot v_z - 150\omega_y |\omega_y|. \end{aligned} \quad (33)$$

Тогда, при изменении угла атаки α получим:

$$\begin{aligned} -160 \frac{dv_x(t)}{dt} &= -270(v_z(0,0002\alpha^2 - 0,0026\alpha - 0,0114) \cdot \omega_y(-0,0005\alpha^2 + 0,0155\alpha - 0,1933) + \\ &900(v_y(-0,0013\alpha^2 + 0,0588\alpha - 0,365) \cdot \omega_z(-0,0009\alpha^2 + 0,0146\alpha - 0,0462) - \\ &135(v_x^2(0,0034\alpha^2 - 0,0669\alpha + 1,1321) + 0,5\omega_x^2(-0,0001\alpha^2 + 0,0021\alpha - 0,0053)), \\ -540 \frac{dv_z(t)}{dt} &= -900v_y(-0,0013\alpha^2 + 0,0588\alpha - 0,365) \cdot \omega_x(-0,0001\alpha^2 + 0,0021\alpha - 0,0053) + \\ &80v_x(0,0034\alpha^2 - 0,0669\alpha + 1,1321) \cdot \omega_y(-0,0005\alpha^2 + 0,0155\alpha - 0,1933) - \\ &200(v_z^2(0,0002\alpha^2 - 0,0026\alpha - 0,0114) \cdot 0,5\omega_x^2(-0,0001\alpha^2 + 0,0021\alpha - 0,0053), \\ -120 \frac{d\omega_y(t)}{dt} &= 275v_y(-0,0013\alpha^2 + 0,0588\alpha - 0,365) \cdot \omega_z(-0,0009\alpha^2 + 0,0146\alpha - 0,0462) - \\ &250v_x(0,0034\alpha^2 - 0,0669\alpha + 1,1321) \cdot \omega_x(-0,0001\alpha^2 + 0,0021\alpha - 0,0053) + \\ &150v_x(0,0034\alpha^2 - 0,0669\alpha + 1,1321) \cdot v_z(0,0002\alpha^2 - 0,0026\alpha - 0,0114) - \\ &75\omega_y^2(-0,0005\alpha^2 + 0,0155\alpha - 0,1933). \end{aligned} \quad (34)$$

При изменении угла скольжения β математическая модель ТНПА с учётом присоединённых масс воды

учитывает коэффициенты сопротивления по изменению проекции ТНПА $C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z$.

Одновременное изменение углов атаки и скольжения потребует уже вычисление коэффициентов через двумерную интерполяцию коэффициентов.

Заключение

Идентификация системы управления по наблюдаемым параметрам движения ТНПА определяется по пространственному положению в продольно-поперечной плоскости. Зависимость гидродинамических коэффициентов от угла атаки, скольжения и скоростного крена позволяет рассматривать табличную структуру программного управления в канале решающей обратной связи.

При разработке конструкции телеуправляемых аппаратов блоками плавучести и центровкой стараются получить статически устойчивую конструкцию, блок плавучести обладает наибольшей площадью, чаще соотношение $\frac{S_{xz}}{S_{yz}} = \frac{2/3}{1/3}$. По этим причинам, учитывая низкую скорость перемещения ТНПА, угол скоростного крена можно исключить из анализа.

Полученные функции интерполяции позволяют построить оператор в цепи решающей обратной связи. Вычисляемые матрицы коэффициентов гидродинамического сопротивления при реализации программного вида движения в продольно-поперечной плоскости позволяют построить дискретные (цифровые) пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы упоров ДРК.

Литература

- 1 Данцевич И. М., Звягинцев Н.С., Тарасенко А.А. Управление необитаемыми подводными аппаратами (монография) Издательство: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск, 2012
- 2 Dantsevich I.M., Lyutikova M.N. Geoinformation laboratory for determining objects by unmanned aerial vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference. Stavropol, 2021. C. 12028.
- 3 Lyutikova M.N., Dantsevich I.M., Pankina S.I. THE INTELLIGENT UNDERWATER LABORATORY. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering" 2021. C. 012003.
- 4 Dantsevich I., Lyutikova M., Fedorenko V. NUMERICAL METHOD FOR CORRECTING COMMAND SIGNALS FOR COMBINED CONTROL OF A MULTIENGINE COMPLEX. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 424. C. 117-131
- 5 He, Y., Wang, D. B., & Ali, Z. A. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. Measurement and Control (United Kingdom), (2020). 53(9-10), 1561-1570 <https://doi.org/10.1177/0020294020952483>
- 6 Thomas Thuesen Enevoldsen, Emil Már Einarsson, Simon Pedersen, Zhenyu Yang, Simplified Modelling and Identification of an Inspection ROV, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 8, 2018, Pages 257-262, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.386>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631830716X>)
- 7 Sven Lack, Erik Rentzow, Torsten Jeinsch, Experimental Parameter Identification for an open-frame ROV: Comparison of towing tank tests and open water self-propelled tests, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 21, 2019, Pages 271-276, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.319>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319322049>)
- 8 Chin, C. S., Lin, W. P., & Lin, J. Y. Experimental validation of open-frame ROV model for virtual reality simulation and control. Journal of Marine Science and Technology (Japan), (2018). 23(2), 267–287. <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0469->
- 9 Gabl, R., Davey, T., Nixon, E., Steynor, J., & Ingram, D. M. (2019). Experimental data of a floating cylinder in a wave tank: Comparison solid and water ballast. Data, 4(4). <https://doi.org/10.3390/data4040146>
- 10 Sivčev, S., Rossi, M., Coleman, J., Dooly, G., Omerdić, E., & Toal, D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. Control Engineering Practice, (2018). 74, 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.03.005>
- 11 Trsljić, P., Weir, A., Riordan, J., Omerdic, E., Toal, D., & Dooly, G. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles. Sensors (Switzerland), 20(2). (2020). <https://doi.org/10.3390/s20020529>
- 12 Guan, Z., Zhang, D., Lin, M., & Li, J. Mechanical analysis of remotely operated vehicle. In Proceedings - 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2018 (pp. 446–450). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2018). <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2018.8384717>
- 13 Roman Gabl, Thomas Davey, Yu Cao, Qian Li, Boyang Li, Kyle L. Walker, Francesco Giorgio-Serchi, Simona Aracri, Aristides Kiprakis, Adam A. Stokes, David M. Ingram, Hydrodynamic loads on a restrained ROV under waves and current, Ocean Engineering, Volume 234, 2021, 109279, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109279>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821006995>)
- 14 Simon Pedersen, Jesper Liniger, Fredrik F. Sørensen, Kenneth Schmidt, Malte von Benzon, Sigurd S. Klemmensen, Stabilization of a ROV in Three-dimensional Space Using an Underwater Acoustic Positioning System, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 17, 2019, Pages 117-122, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.037>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319309723>)
- 15 Hexiong Zhou, Junjun Cao, Baoheng Yao, Lian Lian, Hierarchical NMPC–ISMC of active heave motion compensation system for TMS–ROV recovery, Ocean Engineering, Volume 239, 2021, 109834, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109834>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821011902>)
- 16 Shakhray E.A., Lubentsova E.V., Lubentsov V.F., Meflekh M.V. Analysis of the stability of multi-mode systems with approximating nonlinear control laws. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 872(1), 2021, номер статьи 012010; doi:10.1088/1755-1315/872/1/012010
- 17 Шахрай Е.А., Лубенцова В.Ф., Лубенцова Е.В. Синтез модифицированного ПИД-регулятора в условиях многорежимности функционирования зашумленного объекта. Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2021. № 1. С. 99-108.
- 18 Лютикова М.Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3-1 (57). С. 153-159.

References

1. Dantsevich I.M., Zvyagintsev N.S., Tarasenko A.A. Upravlenie neobitaemyumi podvodnyumi apparatami [Control of uninhabited underwater vehicles (monograph)] Publishing house: ADMIRAL USHAKOV Maritime State University. Novorossiysk, 2012.
2. Dantsevich I.M., Lyutikova M.N. Geoinformation laboratory for determining objects by unmanned aerial vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference. Stavropol, 2021. C. 12028.
3. Lyutikova M.N., Dantsevich I.M., Pankina S.I. THE INTELLIGENT UNDERWATER LABORATORY. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on "Marine Geology and Engineering"" 2021. C. 012003.

4. Dantsevich I., Lyutikova M., Fedorenko V. Numerical method for correcting command signals for combined control of a multiengine complex. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. T. 424. C. 117-131
5. He, Y., Wang, D. B., & Ali, Z. A. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. *Measurement and Control (United Kingdom)*, (2020). 53(9-10), 1561-1570 <https://doi.org/10.1177/0020294020952483>
6. Thomas Thuesen Enevoldsen, Emil Már Einarsson, Simon Pedersen, Zhenyu Yang, Simplified Modelling and Identification of an Inspection ROV, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51, Issue 8, 2018, Pages 257-262, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.386>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631830716X>)
7. Sven Lack, Erik Rentzow, Torsten Jeansch, Experimental Parameter Identification for an open-frame ROV: Comparison of towing tank tests and open water self-propelled tests, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 52, Issue 21, 2019, Pages 271-276, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.319>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319322049>)
8. Chin, C. S., Lin, W. P., & Lin, J. Y. Experimental validation of open-frame ROV model for virtual reality simulation and control. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, (2018). 23(2), 267–287. <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0469->
9. Gabl, R., Davey, T., Nixon, E., Steynor, J., & Ingram, D. M. (2019). Experimental data of a floating cylinder in a wave tank: Comparison solid and water ballast. *Data*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/data4040146>
10. Sivčev, S., Rossi, M., Coleman, J., Dooly, G., Omerdić, E., & Toal, D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. *Control Engineering Practice*, (2018). 74, 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.03.005>
11. Trslíć, P., Weir, A., Riordan, J., Omerdic, E., Toal, D., & Dooly, G. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles. *Sensors (Switzerland)*, 20(2). (2020). <https://doi.org/10.3390/s20020529>
12. Guan, Z., Zhang, D., Lin, M., & Li, J. Mechanical analysis of remotely operated vehicle. In *Proceedings - 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2018* (pp. 446–450). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2018). <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2018.8384717>
13. Roman Gabl, Thomas Davey, Yu Cao, Qian Li, Boyang Li, Kyle L. Walker, Francesco Giorgio-Serchi, Simona Aracri, Aristides Kiprakis, Adam A. Stokes, David M. Ingram, Hydrodynamic loads on a restrained ROV under waves and current, *Ocean Engineering*, Volume 234, 2021, 109279, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109279>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821006995>)
14. Simon Pedersen, Jesper Liniger, Fredrik F. Sørensen, Kenneth Schmidt, Malte von Benzong, Sigurd S. Klemmensen, Stabilization of a ROV in Three-dimensional Space Using an Underwater Acoustic Positioning System, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 52, Issue 17, 2019, Pages 117-122, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.037>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319309723>)
15. Hexiong Zhou, Junjun Cao, Baoheng Yao, Lian Lian, Hierarchical NMPC–ISMC of active heave motion compensation system for TMS–ROV recovery, *Ocean Engineering*, Volume 239, 2021, 109834, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109834>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821011902>)
16. Shakhray E.A., Lubentsova E.V., Lubentsov V.F., Meflekh M.V. Analysis of the stability of multi-mode systems with approximating nonlinear control laws. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 872(1), 2021, nomer stat'i 012010; doi:10.1088/1755-1315/872/1/012010
17. Shakhray E.A., Lubentsov V.F., Lubentsova E.V. Synthesis of a modified PID controller under conditions of a multi-mode function of a noisy object. *Electronic network political journal Scientific works KubGTU*. 2021. №1. 99-108.
18. Lyutikova M.N. Improving the control of a multi-purpose towed complex using a neural network controller in the asymptotics of Bernstein polynomials. *Marine Intelligent Technologies* 2022. № 3-1 (57). C. 153-159

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Михайлович Данцевич кандидат технических наук, исполнительный директор НИИ: ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353918, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93.

Igor M. Dantsevich Ph.D. (Eng), Executive Director of Research Institute: Admiral Ushakov maritime state university, 353918, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Валерий Фёдорович Лубенцов доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 359000, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Красная, 135.

Valery F. Lubentsov Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kuban State Technological University, 359000, Russia, Krasnodar region, Krasnodar, Krasnaya str., 135. e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 29.09.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 10.10.2022.

Научная статья

УДК 532.5:539.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.050>**Изгибно-гравитационные волны в море с ледяным покровом от движущихся возмущений в условиях равномерного сжатия**

А.А. Ярошенко^{1,2} yaroshenko.575@yandex.ru, **Ж.В. Маленко**¹ zhvla17@mail.ru,
Е.В. Маркина² alkit28@yandex.ru, **А.Л. Боран-Кешишьян**¹ bk.anastas@gmail.com,
А.И. Кондратьев¹ kaikondr@gmail.com

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова²Севастопольский государственный университет

Аннотация. В зимний период многие реки, озера и моря в северных широтах покрываются льдом. Для продления навигации возникает необходимость разрушения ледяного покрова. Для этой цели используются суда на воздушной подушке. Ледяной покров используется также в качестве ледовых переправ и доставки по ним различных грузов. Поэтому важно знать режимы движения источника возмущений, при которых происходит разрушение ледяного покрова. В линейной постановке выполнен теоретический анализ влияния ледового сжатия и скорости перемещения нагрузки на трехмерные изгибно-гравитационные волны, которые при этом образуются. Ледяной покров моделируется тонкой упругой изотропной пластинкой, плавающей на поверхности жидкости конечной глубины. Уравнение колебаний пластинки принимается в качестве граничного условия на поверхности жидкости. На основе аналитических выражений, полученных методом интегральных преобразований, проведено исследование структуры возникающего волнового движения. Для скорости перемещения нагрузки больше минимального значения фазовой скорости изгибно-гравитационной волны образуется одна, три или две системы волн. При больших значениях сжимающего усилия существенно меняется характер волнового возмущения в волновом следе за источником, происходит наложение волн. В этом случае, в зависимости от скорости перемещения источника, образуется от двух до трех систем волн. Получены аналитические выражения для критических скоростей, при которых происходит изменение структуры волнового возмущения. Исследуется зависимость критических скоростей от сил сжатия, растяжения и толщины ледяного покрова. Определены угловые зоны, в которых образуются волны. Исследовано влияние сжимающих усилий и скорости перемещения возмущений на размеры угловых зон, покрытых волнами.

Ключевые слова: изгибно-гравитационные волны, упругая пластина, ледяной покров, движущиеся возмущения, критическая скорость, сжимающее усилие, угловые зоны.

Для цитирования: Ярошенко А.А., Маленко Ж.В., Маркина Е.В., Боран-Кешишьян А.Л., Кондратьев А.И. Изгибно-гравитационные волны в море с ледяным покровом от движущихся возмущений в условиях равномерного сжатия. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 251—257.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.050>**Flexural-gravitational waves in the sea with ice cover from moving disturbances under conditions of uniform compression**

Alexander A. Yaroshenko^{1,2} yaroshenko.575@yandex.ru, **Zhanna V. Malenko**¹ zhvla17@mail.ru,
Elena V. Markina² alkit28@yandex.ru, **Anastas L. Boran-Keshishyan**¹ bk.anastas@gmail.com,
Aleksey I. Kondratyev¹ kaikondr@gmail.com

¹Admiral Ushakov Maritime State University²Sevastopol State University

Abstract. In winter, many rivers, lakes and seas in the northern latitudes are covered with ice. In order to prolong navigation, it becomes necessary to destroy the ice cover. Hovercraft are used for this purpose. The ice cover is also used as ice crossings and the delivery of various cargoes along them. Therefore, it is important to know the modes of motion of the source of disturbances, at which the destruction of the ice cover occurs. In the linear formulation, a theoretical analysis of the effect of ice compression and the speed of load displacement on three-dimensional bending-gravity waves, which are formed in this case, is carried out. The ice cover is modeled by a thin elastic isotropic plate floating on the surface of a liquid of finite depth. The oscillation equation of the plate is taken as a boundary condition on the surface of the liquid. On the basis of analytical expressions obtained by the method of integral transformations, the structure of the emerging wave motion is studied. For the velocity of the load movement greater than the minimum value of the phase velocity of the bending-gravitational wave, one, three or two wave systems are formed. At large values of the compressive force, the nature of the wave disturbance in the wave wake behind the source changes significantly, waves overlap. In this case, depending on the speed of movement of the source, from two to three wave systems are formed. Analytical expressions are obtained for the critical velocities at which the structure of the wave disturbance changes. The dependence of critical velocities on the forces of compression, stretching and thickness of the ice sheet is investigated. The angular zones in which waves are formed are determined. The influence of compressive forces and the velocity of displacement of disturbances on the sizes of angular zones covered by waves is investigated.

Keywords: flexural-gravitational waves, elastic plate, ice cover, moving perturbations, critical speed, compressive force, corner zones.

For citation: Alexander A. Yaroshenko, Zhanna V. Malenko, Elena V. Markina, Anastas L. Boran-Keshishyan, Aleksey I. Kondratyev Flexural-gravitational waves in the sea with ice cover from moving disturbances under conditions of uniform compression. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 251—257.

Введение

Наличие плавающего ледяного покрова на реках и водоемах с одной стороны препятствует судоходству, а с другой стороны может служить переправой или взлетно-посадочной полосой. При движении по плавающему ледяному покрову судна на воздушной подушке (СВП) или автомобиля в нем развиваются системы изгибно-гравитационных волн. Поэтому исследование плавающего ледяного покрова при движении по нему нагрузки строится в зависимости от того является ли разрушение льда желательным или нежелательным.

Для продления навигации возникает необходимость разрушения плавающего ледяного покрова. Работы [3, 5] посвящены исследованию разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке. При движении СВП с определенной скоростью создаются условия для разрушения ледяного покрова [4].

В книге [7] изучаются плоские задачи, посвященные исследованию колебаний ледяного покрова при воздействии на него динамических нагрузок. В [1, 2, 8] изучаются пространственные изгибно-гравитационные волны, возникающие при движении по нему нагрузки. В [6] исследуются амплитуды изгибно-гравитационных волн для различных скоростей перемещения источника возмущений. Настоящая работа посвящена исследованию влияния сжимающих усилий на характер волнового возмущения и значения критических скоростей перемещения нагрузки.

Постановка задачи и ее решение

Пусть на поверхности идеальной несжимаемой жидкости конечной глубины H плавает тонкая упругая изотропная пластина толщины h . Считаем движение жидкости потенциальным, а скорости движения частиц жидкости и прогиб пластины ζ малыми. По поверхности пластины перемещается со скоростью v нагрузка $p = \rho_0 f(x_1, y)$, $x_1 = x + vt$.

Задача в системе координат x_1, y , связанной с движущейся областью давлений, сводится к решению уравнения Лапласа для потенциала скорости φ :

$$\Delta \varphi = 0, \quad -H < z < 0, \quad -\infty < x, y < \infty \tag{1}$$

с граничными условиями:

$$D_1 \nabla^4 \zeta + Q_1 \Delta_1 \zeta + \chi_1 v^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x^2} + \zeta + \frac{v}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = p_1 f(x, y), \quad z=0; \tag{2}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad z=-H; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = v \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad z=0,$$

где $\nabla^4 = \Delta_1^2$, $\Delta_1 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$, $D_1 = D / \rho g$, $Q_1 = Q / \rho g$, $\chi_1 = \rho_1 h / \rho g$, $p_1 = \rho_0 / \rho g$, $D = Eh^3 / (12(1-\mu^2))$, ρ - плотность жидкости; E, h, ρ_1, μ - модуль нормальной упругости, толщина, плотность и коэффициент Пуассона пластинки; Q - сжимающее усилие.

Применяя для решения задачи (1)-(2) преобразование Фурье по горизонтальным

координатам, получим следующее представление для прогиба плавающей упругой пластины:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} p_1 \operatorname{Re} \left\{ \int_{r_1}^{r_2} \frac{r}{\tau} f^*(r) M(r) J(r, R, \gamma) dr \right\}, \tag{3}$$

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{3\pi/2} \frac{1}{k_0} \exp(irR \cos(\theta - \gamma)) d\theta, \tag{4}$$

где $f^*(r)$ - трансформанта Фурье функции $f(R)$, $r = (m^2 + n^2)^{1/2}$, $R = (x^2 + y^2)^{1/2}$, $M(r) = rg(1 + \chi_1 rg \cdot \operatorname{th} rH)^{-1} \operatorname{th} rH$, $m = r \cdot \cos \theta$, $n = r \cdot \sin \theta$, $x = R \cdot \cos \gamma$, $y = R \cdot \sin \gamma$, $k_0 = rv \cdot \cos \theta - \tau$, $\tau = ((1 + Q_1 r^2 + D_1 r^4) M(r))^{1/2}$, r_1, r_2 - вещественные корни уравнения $\tau(r) / r = 0$.

Применим для вычисления интегралов (3) - (4) метод стационарной фазы и интегрирование по частям [2]. Структура волнового движения определяется скоростью перемещения возмущений и величиной сжимающего усилия Q . Количество систем генерируемых волн определяется числом действительных корней уравнения:

$$\operatorname{tg} \gamma = \tau_2(r) \tag{5}$$

$$\tau_2(r) = (\tau' / v) (1 - (\tau / rv)^2)^{1/2} (1 - (\tau \tau' / rv^2))^{-1}$$

Рассмотрим следующие диапазоны скорости перемещения области давлений:

$$0 < v < v_0, \quad v_0 < v < v_1, \quad v_1 < v < (gH)^{1/2}, \quad v > (gH)^{1/2},$$

где: $v_0 = \tau(r_0) / r_0, \tag{6}$

r_0 - единственный положительный корень уравнения $\tau'(r) = 0$;

$$v_1 = \tau_3(r_3), \quad \tau_3 = ((\tau/r)^2 - (\tau'(r\tau' - \tau)^2) / r^3 \tau'')^{1/2}, \tag{7}$$

r_3 - действительный корень уравнения $\tau_3'(r) = 0$.

Анализ полученного решения

Рассмотрим волновое движение, генерируемое движущимся источником возмущений для сжимающих усилий, удовлетворяющих условию: $0 < Q_1 < Q_0$.

$$Q_0 = \tau_4(r_4) \tag{8}$$

$$\tau_4(r) = ((1 + D_1 r^4) \tau_5(r) + 4D_1 r^4 \tau_6(r)) (\tau_5(r) + 2\tau_6(r)) r^{-2}$$

$$\tau_5(r) = \operatorname{th} rH + rH \operatorname{ch}^{-2} rH, \quad \tau_6(r) = (1 + \chi_1 rg \operatorname{th} rH) \operatorname{th} rH.$$

r_4 - корень уравнения $\tau_4'(r) = 0$.

При движении источника возмущений со скоростью $0 < v < v_0$ изгибно-гравитационные волны не образуются, а наблюдается статический прогиб.

Если скорость перемещения нагрузки $v_0 < v < v_1$, то движущиеся возмущения генерируют одну систему упругих волн ζ_3 , затухающую с расстоянием как $R^{-1/2}$.

$$\zeta = \zeta_3 + O(R^{-1}) \quad \text{при } 0 \leq |\gamma| \leq \pi \tag{9}$$

На рис. 1 представлены фазовые портреты упругой волны ζ_3 (9), (13) для $v = 10$ м/с и $Q_1 = 0.5(D_1)^{1/2}$.

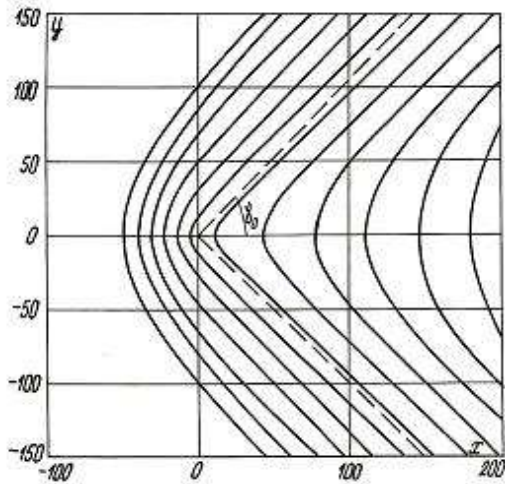


Рис. 1. Линии равной фазы упругой волны ζ_3 . $v=10$ м/с, ($v_0 < v < v_1$); $Q_1=0.5(D_1)^{1/2}$, ($0 < Q_1 < Q_0$).

Эти волны распространяются как впереди источника возмущений, так и за ним. Длина волны, распространяющейся за источником $\lambda_1=2\pi/r_1$, а впереди источника $\lambda_2=2\pi/r_2$. Направление гребней этих волн определяется углом:

$$\gamma_0 = \arctg((v/v_0)^2 - 1)^{-1/2} \quad (10)$$

Если $v_1 < v < (gH)^{1/2}$, то образуется три системы волн: ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 .

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_1 + O(R^{-1}) & \text{при } 0 \leq |\gamma| \leq \gamma_2 \\ \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } \gamma_2 \leq |\gamma| \leq \gamma_1 \\ \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } \gamma_1 \leq |\gamma| \leq \pi \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 2 представлены фазовые портреты волн ζ_1 , ζ_2 и ζ_3 (11), (13) для $v=25$ м/с и $Q_1=(D_1)^{1/2}$. Тонкие сплошные линии - ζ_3 , сплошные - ζ_2 , штрихпунктирные - ζ_1 .

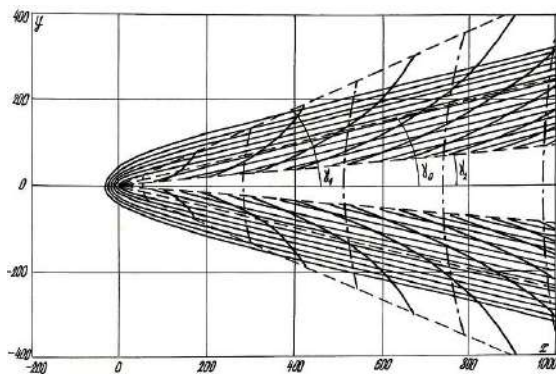


Рис. 2. Линии равной фазы волн ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 . $v=25$ м/с, ($v_1 < v < (gH)^{1/2}$; $Q_1=(D_1)^{1/2}$, ($0 < Q_1 < Q_0$).

Волны ζ_1 носят характер поперечных корабельных волн. Они распространяются внутри угловой зоны $-\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_1$. Характер продольных корабельных волн имеют волны ζ_2 , которые распространяются внутри угловых зон $-\gamma_1 \leq \gamma \leq -\gamma_2$ и $\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_1$. Упругие волны ζ_3 распространяются в угловой зоне $\gamma_2 \leq |\gamma| \leq 2\pi - \gamma_2$.

При скорости $v > (gH)^{1/2}$ образуется две системы волн: ζ_2 , ζ_3 .

$$\zeta = \begin{cases} O(R^{-1}) & \text{при } 0 \leq |\gamma| \leq \gamma_2 \\ \zeta_2 + \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } \gamma_2 \leq |\gamma| \leq \gamma_3 \\ \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } \gamma_3 \leq |\gamma| \leq \pi \end{cases} \quad (12)$$

На рис. 3. представлены фазовые портреты волн ζ_2 и ζ_3 (12), (13) для $v=35$ м/с и $Q_1=(D_1)^{1/2}$. Тонкие сплошные линии - ζ_3 , сплошные - ζ_2 .

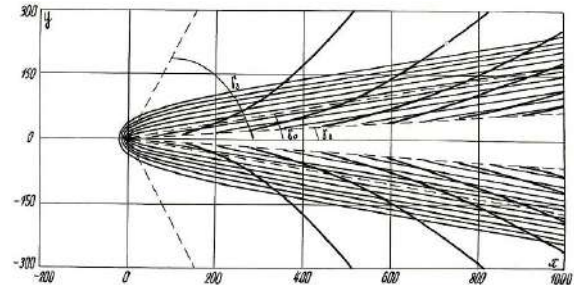


Рис. 3. Линии равной фазы волн ζ_2 , ζ_3 . $v=35$ м/с, ($v > (gH)^{1/2}$); $Q_1=(D_1)^{1/2}$, ($0 < Q_1 < Q_0$).

Волны ζ_2 носят характер продольных корабельных волн и распространяются внутри угловых зон $-\gamma_3 \leq \gamma \leq -\gamma_2$ и $\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_3$. Упругие волны ζ_3 распространяются в угловой зоне $\gamma_2 \leq |\gamma| \leq 2\pi - \gamma_2$. Внутри угловой зоны $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$ волн с амплитудой затухания как $R^{-1/2}$ вообще не образуется.

Здесь для (9), (11), (12):

$$\zeta_k = R^{-1/2} \psi_j(\alpha_k) \cos(R\Phi_j(\alpha_k, \gamma) - (-1)^k(\pi/4)), \quad k=1,2,3; j=1,$$

$$\Phi_j = r((\tau/rv) \cos \gamma + (-1)^j (1 - (\tau/rv)^2)^{1/2} \sin \gamma), \quad (13)$$

$$\psi_j = -f_1(r) M(r) (\tau v (1 - (\tau/rv)^2)^{1/2})^{-1} (2\pi |\Phi_j^*|)^{-1/2},$$

$f_1(r) = f^*(r) r_1$, $f^*(r) = (b/r) J_1(rb)$, J_1 – функция Бесселя, b – радиус области давлений, α_k – корни уравнения (5) $\text{tg} \gamma = \tau_2(r)$.

Значения угловых зон γ_1 , γ_2 , и γ_3 определяются формулами:

$$\gamma_1 = \arctg \tau_2(\alpha_4), \quad \gamma_2 = \arctg \tau_2(\alpha_5), \\ \gamma_3 = \arctg \sqrt{v^2 (gH)^{-1} - 1}^{-1/2}, \quad (14)$$

где α_4, α_5 – действительные корни уравнения $\tau_2^*(r) = 0$.

На рис. 4 приведены зависимости величин углов γ_1 , γ_2 и γ_3 (14) от скорости перемещения нагрузки. Кривые 1-3 соответствуют углам γ_1 , γ_2 и γ_3 соответственно. Сплошные линии отвечают $Q_1=0$, а штрихпунктирные $Q_1=(D_1)^{1/2}$ – сжатие. Увеличение сжимающих усилий приводит к уменьшению значений углов γ_1 и γ_2 . Значение γ_3 не зависит от величины сжимающего усилия.

Угловые зоны образуются при движении нагрузки со скоростями больше критической скорости v_1 . Эти значения помечены на рисунке кружками. При увеличении скорости нагрузки угловая зона поперечных волн ζ_1 (рис. 2) ($-\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_1$) расширяется, достигая максимума $\gamma_1 = \pi/2$ при критической скорости $v = (gH)^{1/2}$. При движении со скоростью большей $(gH)^{1/2}$ волны ζ_1 не образуются. При движении нагрузки со скоростью $v_1 < v < (gH)^{1/2}$ продольные корабельные волны ζ_2 распространяются внутри угловых зон $\gamma_2 \leq |\gamma| \leq \gamma_1$ (рис. 2), которые расширяются при увеличении скорости перемещения нагрузки (рис. 4). Если $v > (gH)^{1/2}$, то продольные волны ζ_2 распространяются в угловых зонах $\gamma_2 \leq |\gamma| \leq \gamma_3$ (рис. 3),

которые сужаются при увеличении скорости движения источника (рис. 4). При $v > v_1$ волны ζ_2 и ζ_3 не распространяются за источником внутри угловой зоны $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$. Эта зона сужается при увеличении скорости перемещения источника возмущений.

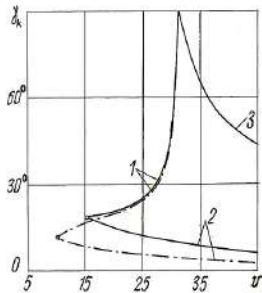


Рис. 4. Зависимость угловых зон от скорости перемещения нагрузки для $0 \leq Q_1 < Q_0$.

Рассмотрим волновое движение для сжимающих усилий, удовлетворяющих условию: $Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$. Здесь Q_0 определяется выражением (8). Условие $Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$ необходимо для устойчивости ледяной пластины [7].

В результате анализа стационарных точек, которые определяются уравнением (5), получим:

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_2 + \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } v_0 < v < v_1 \\ \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } v_1 < v < (gH)^{1/2} \\ \zeta_2 + \zeta_3 + O(R^{-1}) & \text{при } v > (gH)^{1/2} \end{cases} \quad (15)$$

Здесь

$$\zeta_j = R^{-1/2} \psi_j(\alpha_j) \cos(R\Phi_j(\alpha_j, \gamma) + \pi/4), \quad (16)$$

где $j=1$ если $0 \leq \gamma \leq \gamma_1$ и $j=2$ если $-\gamma_1 \leq \gamma \leq 0$.

Вид ζ_2 определяется по формуле:

$$\zeta_2 = R^{-1/2} \psi_j(\alpha_2) \cos(R\Phi_j(\alpha_2, \gamma) - \pi/4), \quad (17)$$

где $j=1$ если $-\gamma_2 \leq \gamma \leq 0$, $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_1$, $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_3$, а $v_0 < v < v_1$, $v_1 < v < (gH)^{1/2}$, $v > (gH)^{1/2}$ соответственно, и $j=2$ если $0 \leq \gamma \leq \gamma_2$, $-\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2$, $-\gamma_3 \leq \gamma \leq \gamma_2$, а $v_0 < v < v_1$, $v_1 < v < (gH)^{1/2}$, $v > (gH)^{1/2}$ соответственно.

Для ζ_3 в каждом из рассматриваемых интервалов изменения скорости v справедливо выражение

$$\zeta_3 = R^{-1/2} \psi_j(\alpha_3) \cos(R\Phi_j(\alpha_3, \gamma) + \pi/4), \quad (18)$$

где $j=1$ если $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \pi$, и $j=2$ при $-\pi \leq \gamma \leq \gamma_2$. Функции ψ_j и Φ_j , входящие в (16) – (18), определяются из (13) соответственно при $j=1$ и $j=2$.

Критическая скорость v_0 определяется, как и в (6), а

$$v_1 = \tau(r_5), \quad (19)$$

где $0 < r_5 < r_6$, r_5, r_6 – действительные корни уравнения $\tau'(r) = 0$.

Для $Q_1 > Q_0$ величины углов γ_1 и γ_3 определяются по формулам (14), а

$$\gamma_2 = -\arctg \tau(r_5) \quad (20)$$

При $0 < v < v_0$ волн, затухающих с расстоянием как $R^{-1/2}$ не образуется. При $v_0 < v < v_1$ образуется две системы волн ζ_2 и ζ_3 (15). На рис. 5 представлены фазовые портреты образующихся волн. Волны ζ_2 (17) распространяются за источником в угловой зоне $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$. Упругие волны ζ_3 (18) распространяются как впереди источника, так и за ним. В угловой зоне $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$ происходит наложение упругих волн.

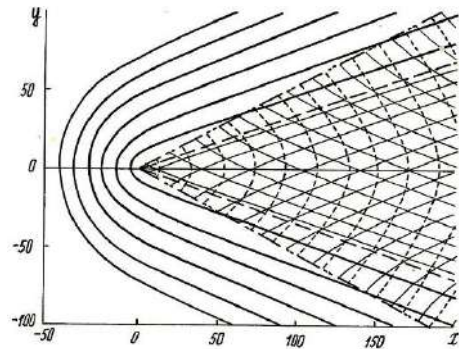


Рис. 5. Фазовые портреты волн ζ_2 и ζ_3 . $v=5$ м/с, ($v_0 < v < v_1$); $Q_1=1,9(D_1)^{1/2}$, ($Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$).
— ζ_3 , - - - ζ_2 , - - - γ_2 , — γ_0 .

Если $v_1 < v < (gH)^{1/2}$, то образуется три системы волн ζ_1 , ζ_2 и ζ_3 (15). На рисунке 6 приведены фазовые портреты этих волн. Поперечные волны ζ_1 (16) распространяются внутри угловой зоны $-\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_1$. При увеличении скорости перемещения нагрузки происходит расширение угловой зоны. При $v=(gH)^{1/2}$ значение $\gamma_1=\pi/2$. Продольные волны ζ_2 (17) распространяются внутри угловой зоны $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$. В этой зоне происходит наложение волн. Эта зона при увеличении скорости движения источника возмущений сужается. Упругие волны ζ_3 (18) распространяются как впереди источника, так и за ним. Волны ζ_3 , распространяющиеся за источником, как и волны ζ_2 распространяются в угловой зоне $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$. В этой зоне также происходит наложение упругих волн.

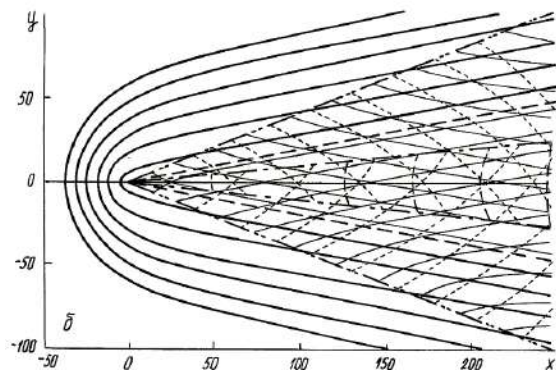
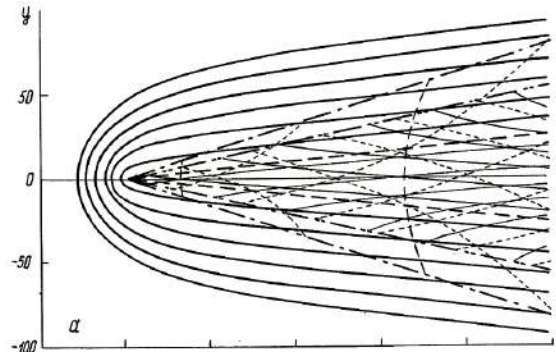


Рис. 6. Фазовые портреты волн ζ_1 , ζ_2 и ζ_3 .
а) $v=20$ м/с, б) $v=10$ м/с, ($v_1 < v < (gH)^{1/2}$);
 $Q_1=1,9(D_1)^{1/2}$, ($Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$).
— ζ_3 , - - - ζ_2 , — ζ_1 , - - - γ_2 , — γ_1 , — γ_0 .

Если $v > (gH)^{1/2}$, то распространяется две системы волн ζ_2 и ζ_3 (15), фазовые портреты которых приведены на рис. 7. Продольные волны ζ_2 распространяются в угловой зоне $-\gamma_3 \leq \gamma \leq \gamma_3$. Упругие волны ζ_3 распространяются как перед областью давлений, так и за ней. В угловой зоне $-\gamma_2 \leq \gamma \leq \gamma_2$ происходит наложение как продольных ζ_2 , так и упругих волн ζ_3 . Эта зона уменьшается при увеличении скорости перемещения возмущений.

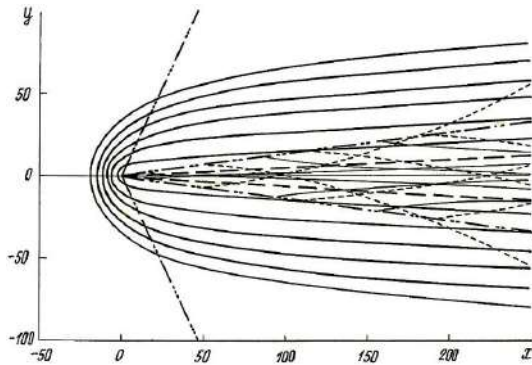


Рис. 7. Фазовые портреты волн ζ_2 и ζ_3 . $v=35$ м/с, $(v > (gH)^{1/2})$; $Q_1=1,9(D_1)^{1/2}$, $(Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2})$.
 — ζ_3 , - - - ζ_2 , — — — γ_3 , — — — γ_2 , — — — γ_0 .

Влияние сжимающих усилий на величины углов γ_k ($k = 0, 1, 2, 3$) ((10), (14), (20)) иллюстрирует рис. 8. Здесь сплошные, штриховые и штрихпунктирные линии отвечают значениям Q_1 равным $1,9(D_1)^{1/2}$, $1,7(D_1)^{1/2}$, $1,5(D_1)^{1/2}$ соответственно. Величина γ_3 , не зависящая от Q_1 , изображена пунктирной кривой. Кружками и треугольниками помечены значения, отвечающие скоростям v_0 и v_1 . Видно, что $\gamma_0 = \pi/2$, $\gamma_2 = 0$ при $v = v_0$, а $\gamma_1 = 0$ при $v = v_1$. Если $v = (gH)^{1/2}$, то $\gamma_1 = \gamma_3 = \pi/2$. С ростом v углы γ_0 и γ_3 убывают, а γ_1 увеличивается. Угол γ_2 с увеличением v сначала растёт, достигая максимального значения, а затем убывает. При этом имеются значения v , когда $\gamma_0 = \gamma_1$ и $\gamma_1 = \gamma_2$.

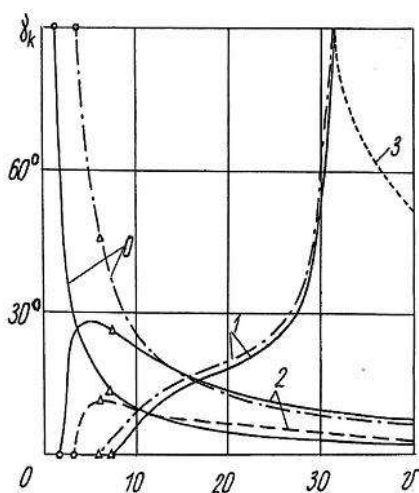


Рис. 8. Зависимость угловых зон от скорости перемещения нагрузки для $Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$

С увеличением сжимающего усилия, для фиксированного v углы γ_0 и γ_1 уменьшаются, а γ_2

растёт. Следовательно, меняется и структура волнового следа за движущейся областью давлений.

На рис. 9 приведены зависимости критических скоростей v_0 (6) и v_1 (7), (19) от сжимающих и растягивающих усилий. Здесь $Q_3 = Q_1 / (D_1)^{1/2}$. Отрицательные значения Q_3 характеризуют растяжения, а положительные сжатие. Сплошные линии отвечают значениям v_0 , а штриховые v_1 . Линии по порядку снизу – вверх соответствуют толщине ледяной пластины равной 0,2, 0,5, и 1 м. Значения критических скоростей v_0 и v_1 увеличиваются при увеличении толщины ледяного покрова. При $Q_1 < Q_0$ значения критических скоростей v_0 и v_1 убывают с ростом Q . При $Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$ величина v_0 уменьшается, а v_1 растёт с увеличением сжимающего усилия. При $Q_1 = Q_0$, $v_0 = v_1$.

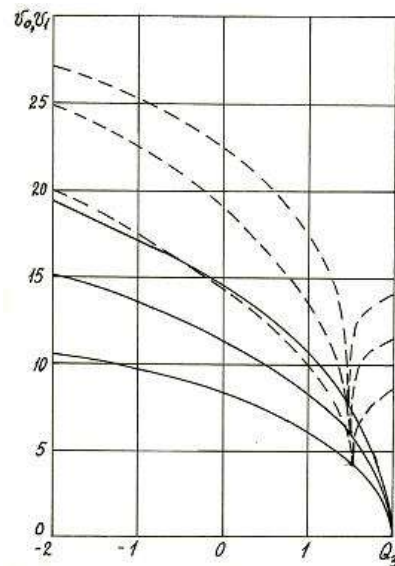


Рис. 9. Зависимость критических скоростей v_0 и v_1 от растягивающих и сжимающих усилий.

Для количественной оценки численные расчеты проводились для следующих параметров ледяного покрова и жидкости: $E=3 \cdot 10^9$ Н/м², $\rho=870$ кг/м³, $\rho_1=10^3$ кг/м³, $\mu=0,34$, $H=10^2$ м, $h=0,2$ м.

Заключение

В зависимости от скорости перемещения возмущений меняется характер колебаний плавающего ледяного покрова. Движущимися возмущениями постоянной интенсивности может генерироваться от одной до трех систем волн.

Существует три значения критических скоростей, при которых меняется характер волнового возмущения. Это v_0 , v_1 и $(gH)^{1/2}$, где v_0 – минимальное значение фазовой скорости изгибно-гравитационной волны, а $(gH)^{1/2}$ – скорость распространения длинных волн. Для разрушения ледяного покрова наибольший интерес представляют критические скорости v_0 и v_1 . Чем больше толщина ледяного покрова, тем с большей скоростью должно двигаться СВП для достижения резонансной скорости.

При больших значениях сжимающего усилия ($Q_0 < Q_1 < 2(D_1)^{1/2}$) существенно меняется структура волнового следа в волновом следе за источником. При $0 < Q_1 < Q_0$ характер волнового возмущения качественно такой же, как и для сил растяжения.

Литература

1. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 360 с.
2. Букатов А.Е., Черкесов Л.В., Ярошенко А.А. Изгибно-гравитационные волны от движущихся возмущений // ПМТФ, 1984. № 2. С. 151-157.
3. Зуев В.А., Козин В.М. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1988. 128 с.
4. Козин В.М. Способы определения критических скоростей нагрузок, движущихся в условиях сплошного ледяного покрова (обзор). // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2019. № 2(39). С. 30-38. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-4>
5. Козин В.М., Земляк В.Л., Баурин Н.О., Ипатов К.И. Способ разрушения ледяного покрова судном на воздушной подушке. // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. № 4(33). 2018. С. 85-91.
6. Маленко Ж.В., Ярошенко А.А. Изгибно-гравитационные волны в море с ледяным покровом от движущихся возмущений // Морские интеллектуальные технологии. Т. 4(52), № 2, 2021. С. 157-161. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.086.
7. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 215 с.
8. Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D., Langhorne P.J. Moving Loads on Ice Plates. Springer Science & Business Media. 2012. 236 p.

References

1. Bukatov A.E. Volny v more s plavayushchim ledyanym pokrovom [Waves in the sea with a floating ice cover]. Sevastopol: FSBSI MHI, 2017. 360 p.
2. Bukatov A.E., Cherkesov L.V., Yaroshenko A.A. Izgibno-gravitatsionnyye volny ot dvizhushchikhsya vozmushcheniy. [Bending-gravitational waves from moving perturbations]. PMTF, 1984. No. 2. pp. 151-157.
3. Zuev V.A., Kozin V.M. Ispol'zovaniye sudov na vozdushnoy podushke dlya razrusheniya ledyanogo pokrova [The use of hovercrafts for the destruction of the ice cover]. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern University, 1988. 128 p.
4. Kozin V. M. Spособы opredeleniya kriticheskikh skorostey nagruzok, dvizhushchikhsya v usloviyakh sploshnogo ledyanogo pokrova (obzor). [Methods for determining the critical speeds of loads moving in the conditions of a continuous ice cover (review)]. Bulletin of the Engineering School of the FEFU. 2019. No. 2(39). pp. 30-38. DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-4>.
5. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Baburin N.O., Ipatov K.I. Spособ razrusheniya ledyanogo pokrova sudnom na vozdushnoy podushke. [The method of destruction of the ice cover by an air-cushion vessel]. Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleichem. No. 4(33). 2018. pp. 85-91.
6. Malenko Zh.V., Yaroshenko A.A. Izgibno-gravitatsionnyye volny v more s ledyanym pokrovom ot dvizhushchikhsya vozmushcheniy [Bending-gravitational waves in the sea with ice cover from moving disturbances]. Marine intelligent technologies. T. 4(52), № 2. 2021. pp. 157-161. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.086.
7. Heisin D.E. Dinamika ledyanogo pokrova. [Dynamics of the ice cover]. L.: Hydrometeoizdat, 1967. 215 p.
8. Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D., Langhorne P.J. Moving Loads on Ice Plates. Springer Science & Business Media. 2012. 236 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Александрович Ярошенко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальных дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Alexander A. Yaroshenko, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Head of the Department of Fundamental Disciplines, Branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University» in Sevastopol, 299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Жанна Владимировна Маленко, старший преподаватель кафедры фундаментальных дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, e-mail: zhvla17@mail.ru

Zhanna. V. Malenko, Senior Lecturer of the Department of Fundamental Disciplines, Branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University» in Sevastopol, 299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: zhvla17@mail.ru

Елена Владимировна Маркина, аспирант, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: alkit28@yandex.ru

Elena. V. Markina, graduate student, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, e-mail: alkit28@yandex.ru

Анастас Леонидович Боран-Кешишьян, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, д. 93, e-mail: bk.anastas@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D. (Eng), assistant professor, vice-rector for conventional training and developments, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353924, Russian Federation, e-mail: bkanastas@gmail.com

Алексей Иванович Кондратьев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, д. 93, e-mail: bk.anastas@gmail.com

Aleksey I. Kondratyev, Ph.D. (Eng), assistant professor, Navigation Department, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk 353924, Russian Federation, e-mail: mail@nsma.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2022.

Научная статья

УДК 56.61, 658.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.051>

Математическая модель технологического процесса выгрузки грузов на необорудованное побережье с использованием саморазборных понтонов

В.С. Горенькова¹ gorenkovavs@gumrf.ru, Ю.Д. Кравец² yurakravets1977@mail.ru,

А.В. Кириченко¹ kirichenkoav@gumrf.ru

¹ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», ²ФГКВБОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева»

Аннотация. При решении задач в оперативном режиме по организации, планированию и управлению морскими грузовыми перевозками часто возникают ситуации, когда транспортная система представляет собой сложный механизм взаимодействия. Осуществить адекватное описание функционирования такой сложной системы с помощью традиционного классического математического аппарата не представляется возможным, а проведение натурных испытаний требует больших затрат. Одним из возможных путей преодоления данной проблемы является применение методов математического моделирования.

В данной статье был произведен анализ условий и способов выгрузки грузов во внепортовых условиях на примере США, были рассмотрены транспортно-технологические системы выгрузки грузов на необорудованное побережье при помощи различных рейдовых плавательных средств. В итоге была предложена транспортно-технологическая схема выгрузки грузов на необорудованное побережье как максимизация суммарного количества грузовых единиц заданной категории, доставляемых на необорудованное побережье за определенный период времени, а в качестве основного средства доставки материальных средств во внепортовых условиях являются саморазборные понтоны, из которых формируется плавпричал, позволяющий осуществлять выгрузку материальных средств на необорудованное побережье. В основе математической модели транспортно-технологической системы выгрузки грузов на необорудованный берег Арктической зоны Российской Федерации с использованием саморазборных понтонов лежит метод обобщенного понижающего градиента. В рассматриваемой модели обозначены исходные данные, условия работоспособности модели, а также ее расчетные характеристики. В процессе моделирования транспортно-технологической системы с использованием саморазборных понтонов были проведены расчеты длительности технологических операций и стоимостных характеристик технологических ресурсов.

Ключевые слова: грузовая единица, внепортовые условия, саморазборный понтон, плавпричал, грузовая плавплощадка, ричстакер, буксир, плавплатформа.

Для цитирования: Горенькова В.С., Кравец Ю.Д. Кириченко А.В. Математическая модель технологического процесса выгрузки грузов на необорудованное побережье с использованием саморазборных понтонов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 258—264.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.051>

Mathematical model of the technological process of unloading cargoes on the unequipped coast with the use self-assemblable pontoons

Victoria S. Gorenkova¹ gorenkovavs@gumrf.ru, Yuri D. Kravets² yurakravets1977@mail.ru, Aleksandr V.

Kirichenko¹ kirichenkoav@gumrf.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation, ²Federal State-Owned «Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. When solving problems in the online mode for the organization, planning and management of maritime cargo transportation, situations often arise when the transport system is a complex interaction mechanism. To carry out an adequate description of the functioning of such a complex system using the traditional classical mathematical apparatus is not possible, and carrying out full-scale tests is costly. One of the possible ways to overcome this problem is the use of mathematical modeling methods.

In this article, an analysis was made of the conditions and methods for unloading cargo in off-port conditions using the example of the United States, and the transport and technological systems for unloading cargo on an unequipped coast using various offshore watercraft were considered. As a result, a transport and technological scheme for unloading cargo on an unequipped coast was proposed as a maximization of the total number of cargo units of a given category delivered to an unequipped coast for a certain period of time, and as the main means of delivering material assets in non-port conditions are self-dismounting pontoons, from which a floating berth is formed, which allows unloading material resources on an unequipped coast. The basis of the mathematical model of the transport and technological system for unloading cargo on the unequipped coast of the Arctic zone of the Russian Federation using self-collapsing pontoons is the method of a generalized downward gradient. In the model under consideration, the initial data, the conditions for the model's performance, as well as its calculated characteristics are indicated. In the process of

modeling the transport and technological system using self-collapsing pontoons, calculations were made of the duration of technological operations and the cost characteristics of technological resources.

Keywords: cargo unit, out-of-port conditions, self-dismountable pontoon, floating berth, cargo floating platform, reachstacker, tug, floating platform.

For citation: Victoria S. Gorenkova, Yuri D. Kravets, Aleksandr V. Kirichenko Mathematical model of the technological process of unloading cargoes on the unequipped coast with the use self-assemblable pontoons, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 258—264.

Введение

В настоящее время расширяется экономическое присутствие в Арктической зоне Российской Федерации, которое характеризуется как широкой ведомственной принадлежностью реконструируемых (возрождаемых) и вновь создаваемых объектов, так и их масштабом – от вновь строящихся заводов и портов с сопутствующей инфраструктурой до отдельных объектов. Во всех случаях деятельность начинается с первичной доставки материальных средств на возрождаемый (создаваемый) объект [1], не говоря уже о северном (навигационном) заводе и доставке контейнеризованных грузов.

Основная проблема заключается в закономерной происходящей контейнеризации генеральных грузов и соответствующему изменению их технологического облика, что в свою очередь приводит к снижению возможностей использования универсальных судов с собственными грузовыми средствами, имеющими способность выгружать и поднимать рейдовые плавсредства (РПС) различной конструкции и производить их загрузку и выгрузку, а также к увеличению спроса на специализированные суда.

В США, а также в ряде стран НАТО реализована комплексная контейнерная транспортно-технологическая система внепортовой обработки судов, в которой в качестве технологической основной составляющей для выполнения погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) с контейнеризованными грузами выступают береговые мобильные перегрузочные средства специальной конструкции (например: контейнерные авопогрузчики от компаний «Kalmag» и «Cargerrillar»), либо рейдовые выгрузочные комплексы специальной конструкции, включающие буксируемые плавпричалы, или же используются полупогружные суда специальной конструкции. [2]

Однако, такой путь развития и формирования инфраструктурной составляющей системы перевозок, как в США и странах НАТО, довольно длителен и затратен. В Арктической зоне РФ целесообразнее использовать транспортно-технологические схемы (ТТС) выгрузки грузов с применением РПС.

Разработке ТТС с использованием РПС посвящены труды таких специалистов, как: А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецова, А.А. Давыденко, О.А. Изотова, А.Ю. Мегалинской, В.Н. Щабельского, Д.Ю. Кравца, А.З. Джиоева и др. [3]–[6] Среди иностранных специалистов публикации в основном касаются в основном только маршрута по Северному морскому пути, его сравнению с маршрутом через Суэцкий канал (JeromeVerny, Christophe Grigentin) [7], тенденций развития судоходства на СМП (Björn Gunnarsson) [8], влияния коммерциализации СМП на

страны Европы (Ji Min Sur, Dong Jin Kim) [9], состояние развития и спрос на порты СМП (DanWang, Danyang Li, Yu Gong, Rui Wang, Jie Wang, Xiaoling Huang) [10] и т.п., не касаясь ТТС с использованием РПС.

Исходя из анализа публикаций в рассматриваемой области, можно сделать вывод, что данная тема требует дальнейшего исследования ТТС выгрузки грузов на необорудованное побережье с использованием РПС, а также их математического представления.

Целью данной статьи является предложить математическую модель метода выгрузки грузов на необорудованное побережье с использованием саморазборных понтонов.

Математическая модель технологического процесса выгрузки грузов с использованием саморазборных понтонов

Модель рассматриваемой транспортно-технологической системы определяется тем, что в качестве основного средства доставки материальных средств во внепортовых условиях являются саморазборные понтоны, из которых формируется плавпричал, позволяющий осуществлять выгрузку грузов на необорудованном берегу с использованием метода обобщенного понижающего градиента. Грузовая плавплощадка формируется из саморазборных понтонов, на которую выгружают материальные средства, находящиеся на судне.

Для реализации выполнения основных операций по выгрузке контейнеров или техники с судна требуется выполнить следующие мероприятия (рис. 1):

- сформировать плавпричал из саморазборных понтонов, выгрузить на плавпричал ричстакер, осуществить транспортировку плавпричала к берегу при помощи буксира и надежно закрепить;
- оборудовать выгрузочную плавплощадку из 4-х и более саморазборных понтонов;
- использовать плавплощадку для выгрузки на нее контейнеров или техники и дальнейшей ее транспортировки к плавпричалу, где техника имеет возможность съезжать на берег своим ходом, а контейнеры будут выгружаться при помощи ричстакера, находящегося на берегу. [1, 2, 11]

При оценке транспортных средств используются следующие характеристики: технические данные плавпричала, плавплатформы, вместимость плавплатформы в контейнерах и единицах техники 1 (тяжелой – 10 тонн и более) и 2 категории (легкой – до 10 тонн) техники соответственно. [3]

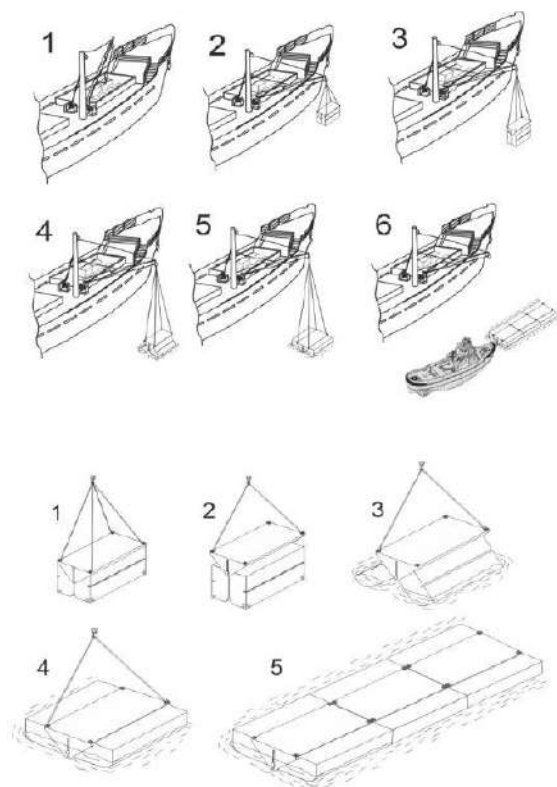


Рис. 1. Способ формирования плавпричала на необорудованном побережье при помощи саморазборных понтонов (Патент на изобретение № 2716381, 09.07.2019. Опубликовано: 11.03.2020 Бюл. №8

Уравнение целевой функции (1) для предлагаемой транспортно-технологической схемы выгрузки воинских грузов на необорудованное побережье представляет собой максимизацию суммарного количества грузовых единиц заданной категории, доставляемых на необорудованное побережье за определенный период времени, при соответствующих ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n N_c + N_{m1} + N_{m2} \rightarrow \max; \quad (1)$$

где:

N_c – количество контейнеров;

N_{m1} – количество единиц техники категории 1 для транспортировки;

N_{m2} – количество единиц техники категории 2 для транспортировки.

Основными расчетов технологического процесса по выгрузке грузов с использованием саморазборных понтонов являются:

- характеристики транспортных средств;
- количественные характеристики технологического процесса;
- временные характеристики технологического процесса;
- агрегированные временные характеристики технологических ресурсов;
- показатели использования технологических ресурсов;
- агрегированные стоимостные характеристики технологических ресурсов.

К характеристикам плавпричала относятся (2 – 5):

– количество саморазборных понтонов в составе плавпричала (2):

$$n_{fd}^p = n_{fd}^1 \cdot n_{fd}^b, \text{ ед.} \quad (2)$$

где:

n_{fd}^1 – количество понтонов по продольному габариту;

n_{fd}^b – количество понтонов по поперечному габариту.

– продольный габарит плавпричала (3):

$$L_{fd} = l_p \cdot n_{fd}^1, \text{ м} \quad (3)$$

где:

l_p – продольный габарит понтона (вдоль продольной стороны плавсредства).

– поперечный габарит плавпричала (4):

$$B_{fd} = b_p \cdot n_{fd}^b, \text{ м} \quad (4)$$

где:

b_p – поперечный габарит понтона (вдоль поперечной стороны плавсредства).

– грузоподъемность плавпричала (5):

$$G_{fd} = g_p \cdot n_{fd}^p, \text{ кг} \quad (5)$$

где:

g_p – грузоподъемность понтона.

Характеристика плавплатформы должна отвечать тем же требованиям и рассчитывается идентично порядку расчета плавпричала.

Вместимость плавплатформы в контейнерах и единицах техники 1 и 2 категории рассчитываются (6 – 8):

– по максимальному количеству контейнеров (техники) по габариту платформы (6):

$$n_{fp}^{c \max} = \frac{\max(L_{fp}, B_{fp})}{\min(l_c, b_c)}, \text{ шт.} \quad (6)$$

где:

L_{fp} – продольный габарит платформы;

B_{fp} – поперечный габарит платформы.

– по вместимости плавплатформы по грузоподъемности (7):

$$N_{fp}^{c G} = \left\lfloor \frac{G_{fp}}{m_c} \right\rfloor, \text{ шт.} \quad (7)$$

где:

G_{fp} – грузоподъемность плавплатформы;

m_c – масса контейнера.

– по фактической вместимости плавплатформы (8):

$$N_{fp}^c = \min(N_{fp}^{cA}, N_{fp}^{cG}), \text{ шт.} \quad (8)$$

В представленных зависимостях вместимость плавплатформы указана для контейнеров, а для расчета вместимости плавплатформы для единиц техники категории 1 и 2 необходимо подставить соответствующие исходные данные.

В качестве количественных характеристик технологического процесса используются формулы (9 – 10):

– количество транспортных партий контейнеров (единиц техники 1 и 2 категории) (9):

$$Z_c = \left\lfloor \frac{N_c}{N_{fp}^c} \right\rfloor, \text{ ед.} \quad (9)$$

– количество контейнеров (единиц техники 1 и 2 категории) в остаточной партии (10):

$$T_{cr}^p = \Delta t_{cr}^{at p} + H_{cr}^{at p} \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_{cr}^{1f+}} + \frac{1}{\vartheta_{cr}^{1w-}} \right) + \max \left(\frac{\alpha_{cr}^{rp}}{f_{cr}^r}, \frac{L_{cr}^{dp}}{\vartheta_{cr}^{d+}} \right) + \max \left(\frac{\alpha_{cr}^{rp}}{f_{cr}^r}, \frac{L_{cr}^{dp}}{\vartheta_{cr}^{d-}} \right) + H_{cr}^{det p} \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_{cr}^{1f-}} + \frac{1}{\vartheta_{cr}^{1w+}} \right) + \Delta t_{cr}^{det p}, \text{ мин.} \quad (11)$$

1. Длительность технологических операций буксира при транспортировке плавпричала в прибрежную зону (при перемещении от прибрежной зоны к судну, при транспортировке грузовой плавплатформы от судна в прибрежную зону и при транспортировке порожней плавплатформы из прибрежной зоны к судну):

$$T_{tb}^{fd} = \frac{L_{tb}^t}{\vartheta_{tb}^t}, \text{ мин.} \quad (12)$$

2. Длительность технологического цикла ричстакера (13):

$$T_{fd}^{as} = \begin{cases} 2 \cdot T_{cr}^p + (n_{fd}^p - 2) \cdot \max(T_{cr}^p, \Delta t_{mnt}^{p fd}) + \Delta t_{mnt}^{p fd}, & \text{если } n_{fd}^p \geq 2; \\ n_{fd}^p \cdot T_{cr}^p & \text{в противном случае} \end{cases}, \text{ час} \quad (15)$$

2. Длительность процесса погрузки ричстакера на плавпричал (16):

$$T_{rs}^1 = T_{cr}^{rs} + \Delta t_{fix}^{rs}, \text{ мин.} \quad (16)$$

$$T_{fd}^{as t} = 2 \cdot \Delta t_{tb}^{at} + T_{fd}^{as} + T_{rs}^1 + T_{tb}^{fd} + \Delta t_{tb}^{det} + T_{tb}^t, \text{ час} \quad (17)$$

4. Длительность процесса установки плавпричала:

$$T_{fd}^{mnt} = \Delta t_{tb}^{at} + T_{fd}^{as} + T_{rs}^1 + T_{tb}^{fd} + \Delta t_{tb}^{det} + \Delta t_{mnt}^{fd} + \Delta t_{fix}^{rs}, \text{ час} \quad (18)$$

5. Длительность процесса транспортировки номинальной партии контейнеров (единиц техники категории 1 и 2) (19):

$$T_c^b = \begin{cases} (N_{fp}^c - 1) \cdot \max(T_{cr}^c, \Delta t_{fix}^c) + T_{cr}^c + \Delta t_{fix}^c + T_{tb}^{fp} + \Delta t_{tb}^{un1} + (N_{fp}^c - 1) \times \\ \times \max(\Delta t_{fix}^c, T_{rs}^c) + \Delta t_{fix}^c + T_{rs}^c + T_{tb}^{fp-} + \Delta t_{tb}^1, & \text{если } Z_c \geq 2; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \text{ час} \quad (19)$$

6. Длительность процесса транспортировки остаточной партии контейнеров (единиц техники категории 1 и 2) (20):

$$T_c^{b rem} = \begin{cases} (N_c^{rem} - 1) \cdot \max(T_{cr}^c, \Delta t_{fix}^c) + T_{cr}^c + \Delta t_{fix}^c + T_{tb}^{fp} + \Delta t_{tb}^{un1} + (N_c^{rem} - 1) \times \\ \times \max(\Delta t_{fix}^c, T_{rs}^c) + \Delta t_{fix}^c + T_{rs}^c + T_{tb}^{fp-} + \Delta t_{tb}^1, & \text{если } Z_c > 0, Z_{m1} + Z_{m2} > 0; \\ (N_c^{rem} - 1) \cdot \max(T_{cr}^c, \Delta t_{fix}^c) + T_{cr}^c + \Delta t_{fix}^c + T_{tb}^{fp} + \Delta t_{tb}^{un1} + (N_c^{rem} - 1) \times \\ \times \max(\Delta t_{fix}^c, T_{rs}^c) + \Delta t_{fix}^c + T_{rs}^c, & \text{если } Z_c > 0, Z_{m1} + Z_{m2} > 0; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \text{ час} \quad (20)$$

7. Длительность процесса транспортировки всех контейнеров (21):

$$T_c^\Sigma = \begin{cases} \tau_{rs}^{un1} + (Z_c - 1) \cdot T_c^b + T_c^{b rem}, & \text{если } Z_c > 0; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \text{ час} \quad (21)$$

8. Длительность процесса транспортировки всех единиц техники категории 1 и 2 (22):

$$T_{m1}^\Sigma = \begin{cases} \tau_{rs}^{un1} + (Z_{m1} - 1) \cdot T_{m1}^b + T_{m1}^{b rem}, & \text{если } Z_c = 0, Z_{m1} > 0; \\ (Z_{m1} - 1) \cdot T_{m1}^b + T_{m1}^{b rem} & \text{в противном случае} \end{cases}, \text{ час} \quad (22)$$

$$N_c^{rem} = \begin{cases} N_c - (Z_c - 1) \cdot N_{fp}^c, & \text{если } Z_c > 0; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (10)$$

шт.

В качестве временных характеристик технологического процесса в модели являются (11 – 14):

1. Длительность технологического цикла судового крана при перегрузке понтона (ричстакера, контейнера и техники категории 1 и 2) (11):

$$T_{rs}^c = \Delta t_{rs}^{at c} + L_{rs}^t \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_{rs}^{t+}} + \frac{1}{\vartheta_{rs}^{t-}} \right) + \Delta t_{rs}^{det c}, \text{ мин.} \quad (13)$$

3. Средняя длительность выезда единицы техники с плавплатформы (14):

$$T_{un1}^{m1} = \frac{L_{fp}}{\vartheta_{m1}}, \text{ мин.} \quad (14)$$

К агрегированным временным характеристикам технологического процесса в модели относятся:

1. Длительность процесса сборки плавпричала

(15):

3. Длительность интервала времени готовности буксира к работе с плавплатформой (17):

Общая длительность технологического процесса транспортно-технологической системы с использованием саморазборных понтонов составит (23):

$$T^{\Sigma} = T_{fd}^{as} t + T_{fp}^{as} + T_c^{\Sigma} + T_{m1}^{\Sigma} + T_{m2}^{\Sigma}, \quad (23)$$

час

В процессе моделирования транспортно-технологической системы с использованием саморазборных понтонов производятся расчеты стоимостных характеристик технологических ресурсов:

– затраты на обеспечение непрерывной работы стрелового судового крана:

$$C_{cr}^{\Sigma} = c_{cr} \cdot T_{cr}^{\Sigma}, \quad (24)$$

– затраты на обеспечение непрерывной работы монтажной бригады на плавпричале:

$$C_{mnt}^{fd\Sigma} = c_{mnt}^{fd} \cdot T_{mnt}^{fd\Sigma}, \quad (25)$$

– затраты на обеспечение непрерывной работы монтажной бригады на плавплатформе:

$$C_{mnt}^{fp\Sigma} = c_{mnt}^{fp} \cdot T_{mnt}^{fp\Sigma}, \quad (26)$$

– затраты на обеспечение непрерывной работы буксира:

$$C_{tb}^{\Sigma} = c_{tb} \cdot T_{tb}^{\Sigma}, \quad (27)$$

– затраты на обеспечение непрерывной работы ричстакера:

$$C_{rs}^{\Sigma} = c_{rs} \cdot T_{rs}^{\Sigma}, \quad (28)$$

В результате моделирования суммарные затраты на обеспечение непрерывной работы определяются из общей суммы затрат:

$$C^{\Sigma} = C_{cr}^{\Sigma} + C_{mnt}^{fd\Sigma} + C_{mnt}^{fp\Sigma} + C_{tb}^{\Sigma} + C_{rs}^{\Sigma}, \text{ руб.} \quad (29)$$

Заключение

Указанные в модели единицы измерения соответствуют наиболее общему случаю; ввиду зависимости наиболее предпочтительных единиц измерения от значений исходных данных расчетные

формулы представлены в общем виде и не содержат коэффициентов преобразования единиц измерения.

Построение и реализация модели целочисленной нелинейной оптимизации технологического процесса рассматриваемой транспортно-технологической системы с использованием саморазборных понтонов применяется при помощи метода обобщенного понижающего градиента и проверяется в известных программных средах «Microsoft Excel» и «Matlab».

Однако, если использовать саморазборные понтоны при организации выгрузки на необорудованное побережье грузов и техники, необходимо произвести расчеты остойчивости и плавучести, где, в первую очередь, необходимо знать его размеры (длину, высоту, ширину).

Разработка комплексной математической модели оценки показателей транспортно-технологических систем перевозок во внепортовых условиях с использованием существующих и альтернативных способов выгрузки грузов на необорудованное побережье позволила получить необходимые данные по временным и стоимостным показателям. Для определения и обоснования наиболее предпочтительной для применения ТТС в заданной локации назначения, предусмотренной в рамках одного маршрута и в целях обеспечения минимальных суммарных затрат и значений суммарной длительности выгрузочных операций, необходимо разработать метод обоснования рациональных показателей транспортно-технологических систем перевозок во внепортовых условиях.

Научная новизна представленной в статье комплексной математической модели заключается в учете особенностей взаимодействия привлекаемых технологических ресурсов посредством использования элементов теории организации производства – математических описаний последовательного, параллельного и параллельно-последовательного перемещения партий грузов по операциям технологического процесса – при описании операций, предусмотренных в рамках рассматриваемых технологических схем выгрузки; в комбинированном применении элементов аналитического и оптимизационного моделирования при обосновании значений расчетных характеристик на основе исходных данных в рамках технологических схем выгрузки.

Литература

1. Давыденко А. А. Технологические решения по выгрузке контейнерных грузов на необорудованное побережье в условиях Арктики / А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – №5 (39). – С. 7–19.
2. Muller G. Intermodal freight transportation / G. Muller. – 4-th edition. – Washington (DC), USA: EnoTransportation Foundation, 2003. – 437 p.
3. Кириченко, А.В., Изотов, О.А., Мегалинская, А.Ю. Организация и технология внепортовой обработки судов [Текст]: учеб. пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.В. Кириченко. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. – 208 с.
4. Давыденко А. А., Кириченко А. В., Кузнецов А. Л. Обоснование концепции создания транспортной системы совместного использования в Арктическом регионе Российской Федерации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. №3 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kontseptsii-sozdaniya-transportnoy-sistemy-sovmestnogo-ispolzovaniya-v-arkticheskom-regione-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 12.08.2022).
5. Щабельский В.Н. Особенности доставки грузов снабжения в районы Арктики и Крайнего Севера // Санкт-Петербургский морской форум – 2019: Материалы 2-ой Международная научно-практическая конференция 18 апреля 2019 г. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. – С. 83–90.

6. Кравец Ю. Д., Джиоев А. З. Организация погрузочно-разгрузочных работ в условиях Арктики и Крайнего Севера // Санкт-Петербургский морской форум – 2019: Материалы 2-ой Международная научно-практическая конференция 18 апреля 2019 г. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. – С. 97–100.
7. Jerome Verny, Christophe Grigentin. Container shipping on the Northern Sea Route. *International Journal of Production Economics*, Volume 122, Issue 1, November 2009, Pages 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.018>.
8. Björn Gunnarsson. Recent ship traffic and developing shipping trends on the Northern Sea Route—Policy implications for future arctic shipping. *Marine Policy*, Volume 124, February 2021, 104369. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104369>.
9. Ji Min Sur, Dong Jin Kim. Multi criteria evaluation of beneficial effect of commercializing Northern Sea Route on Europe and Asia countries. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Volume 36, Issue 4, December 2020, Pages 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.03.002>.
10. DanWang, Danyang Li, Yu Gong, Rui Wang, Jie Wang, Xiaoling Huang. Development situation and future demand for the ports along the Northern Sea Route. *Research in Transportation Business & Management*, Volume 33, December 2019, 100465. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100465>.
11. Кравец Ю.Д., Шувалов Д.В., Кравец Д.Ю., Кириченко А.В., Кузнецов А.Л. Способ формирования плавпричала на необорудованном побережье при помощи саморазборных понтонов (патент на изобретение). Пат. 2716381 Российская Федерация, МПК В63В 35/36 (2006.01) В63В 35/44 (2006.01) В65G 67/60 (2006.01) E02B 3/06 (2006.01) E01D 15/14 (2006.01); патентообладатель Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии А. В. Хрулева – № 2019122002; заявл. 09.07.2019; опубл. 11.03.2020; Бюл. № 8.

References

1. Davydenko A. A. Tekhnologicheskiye resheniya po vygruzke konteynernykh грузов na neoborudovannoye poberezh'ye v usloviyakh Arktiki [Technological solutions for unloading container cargo on unequipped coast in the Arctic]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2016. No. 5 (39). P. 7–19.
2. Muller G. "Intermodal cargo transportation" 4th edition. Washington (DC), USA: EnoTransportation Foundation, 2003. 437 p.
3. Kirichenko, A.V., Izotov, O.A., Megalinskaya, A.Yu. Organizatsiya i tekhnologiya vneportovoy obrabotki sudov [Organization and technology of out-of-port handling of ships] [Text]: textbook. allowance under total. ed. Dr. tech. Sciences, prof. A.V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013. 208 p.
4. Davydenko A. A., Kirichenko A. V., Kuznetsov A. L. Obosnovaniye kontseptsii sozdaniya transportnoy sistemy sovmestnogo ispol'zovaniya v Arkticheskom regione Rossiyskoy Federatsii [Substantiation of the concept of creating a joint transport system in the Arctic region of the Russian Federation]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2015. No. 3 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kontseptsii-sozdaniya-transportnoy-sistemy-sovmestnogo-ispolzovaniya-v-arkticheskom-regione-rossiyskoy-federatsii> (date: 12.08.2022).
5. Shchabelsky V.N. Osobennosti dostavki грузов snabzheniya v rayony Arktiki i Kraynego Severa [Features of the delivery of goods and supplies to the regions of the Arctic and the Far North]. *Sankt-Peterburgskiy morskoy forum – 2019: Materialy 2-oy Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 18 aprelya 2019 g.* St. Petersburg: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2019. P. 83–90.
6. Kravets Yu. D., Dzhioev A. Z. Organizatsiya pogruchoznorazgruzochnykh работ v usloviyakh Arktiki i Kraynego Severa [Organization of loading and unloading operations in the Arctic and the Far North]. *Sankt-Peterburgskiy morskoy forum – 2019: Materialy 2-oy Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 18 aprelya 2019 g.* St. Petersburg: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2019. P. 97–100.
7. Jerome Verney, Christophe Greentin. "Container shipping along the Northern Sea Route". *International Journal of Industrial Economics*, Volume 122, Issue 1, November 2009, pages 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.018>.
8. Bjorn Gunnarsson. "Recent shipping and shipping trends in the Northern Sea Route - policy implications for the future of Arctic shipping". *Maritime Policy*, Volume 124, February 2021, 104369. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104369>.
9. Ji Min Sur, Dong Jin Kim. "Multi-criteria assessment of the beneficial impact of the commercialization of the Northern Sea Route on the countries of Europe and Asia". *Asian Journal of Shipping and Logistics*, Volume 36, Issue 4, Dec 2020, pages 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.03.002>.
10. Dan Wang, Danyang Li, Yu Gong, Rui Wang, Jie Wang, Xiaolin Huang. "Development status and future demand for the ports of the Northern Sea Route". *Research in Transportation Business & Management*, Volume 33, Dec 2019, 100465. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100465>.
11. Kravets Yu.D., Shuvalov D.V., Kravets D.Yu., Kirichenko A.V., Kuznetsov A.L. Sposob formirovaniya plavprichala na neoborudovannom poberezh'ye pri pomoshchi samorazbornykh pontono [Method for forming a floating berth on an unequipped coast using self-collapsing pontoons] (invention patent). Pat. 2716381 Russian Federation, IPC B63B 35/36 (2006.01) B63B 35/44 (2006.01) B65G 67/60 (2006.01) E02B 3/06 (2006.01) E01D 15/14 (2006.01); Patentee Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V.Khrulyov. No. 2019122002; dec. 07.09.2019; publ. 03.11.2020; Bull. No. 8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктория Сергеевна Горенькова, аспирант кафедры портов и грузовых терминалов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7, e-mail: gorenkovavs@gumrf.ru

Юрий Дмитриевич Кравец, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орден Кутузова и Ленина академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова 8, e-mail: yurakravets1977@mail.ru

Александр Викторович Кириченко, заведующий кафедрой портов и грузовых терминалов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Victoria S. Gorenkova, graduate student of the Department of ports and cargo terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya Str., 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: gorenkovavs@gumrf.ru

Yuri D. Kravets, Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Federal State-Owned «Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V.Khrulyov» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Makarova emb., 8, St. Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: yurakravets1977@mail.ru

Aleksandr V. Kirichenko, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of ports and cargo terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya Str., 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kirichenkoav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 656.615

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.052>

Выбор формы функции аппроксимации размерений судов для целей проектирования морских портов

А.Л. Кузнецов¹ thunder1950@yandex.ru, А.В. Кириченко¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,
А.Д. Семенов¹ asemyonov054@gmail.com

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

Аннотация. Методы, используемые в проектировании морских портов, особенно чувствительны к выбранным исходным данным. В работе указывается, что при этом на создаваемых морских портах часто планируется обрабатывать еще несуществующие суда. В таких ситуациях проектировщику необходимо иметь методы оценки основных параметров судов, которые в дальнейшем будут использоваться для расчета таких параметров как: глубина причала, высота кордона, ширина подходного канала, диаметр разворотного круга. В международной практике проектирования для решения данной задачи используются методы регрессионного анализа, который позволяет построить зависимость изменения одного размерения судна при увеличении его дедвейта. Как правило, в исследованиях, посвященных это задаче, в качестве основной формы аппроксимирующей функции используется степенная зависимость. В статье приводятся ссылки на научно-практические работы, в которых проводится оценка коэффициентов степенной функции для отдельных типов судов. Каждое из исследований нацелено на получение зависимостей только для одного типа судна, а не для всех. В работе доказывается, что размерения судна и дедвейт связаны основными геометрическими зависимостями, заложенными в устройство судно. В качестве аппроксимирующей функции для любого типа судов должна быть использована степенная функция со степенью $1/3$, умноженная на коэффициент, соответствующий типу судна и определенному размерению. Выбранная форма аппроксимации используется для построения зависимостей изменения основных размерений танкеров, балкеров, газозовов и контейнеровозов.

Ключевые слова: проектирование терминалов, морские порты, морские суда, размерения судов, регрессионный анализ, модель размерений судна, акватория порта, теория судна.

Для цитирования: Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Семенов А.Д. Выбор формы функции аппроксимации размерений судов для целей проектирования морских портов. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 265—271.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.052>

The choice of approximation function of ships' dimensions for the purposes of seaport design

Aleksandr L. Kuznetsov¹ thunder1950@yandex.ru, Aleksandr V. Kirichenko¹ KirichenkoAV@gumrf.ru,
Anton D. Semenov¹ asemyonov054@gmail.com

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

Annotation. The methods used in seaport design are extremely sensitive to the chosen input values. The paper points out that the new port is often planned to service the ships that have not been built yet. The authors underline that in such situations the port designers need a method to evaluate basic dimensions of the ships that will be used in the calculations of such parameters as berth dredging level, quay length, the width of approaching channel, the anchorage areas. In the international practice of port design, the methods of linear regressions are used to solve this problem. The methods allows to formulate the mathematical dependence of a ships' dimensions on its deadweight. The researches dedicated to this field usually choose the power function as an approximation. The paper includes several links to the articles which describes the calculation of power function's coefficient for a certain type of ships. At the time the main task of this researches is to find the most fit function for only one type of a ship. The paper proves that the ship dimensions and its deadweight are connected with basic geometrical dependences, defined by the main principles of ship design. The authors underline that the form of this dependency is the power function with exponentiation value equal to $1/3$, multiplied by the coefficient specific to a certain ships' type. The chosen form of approximation is used to build the functions of basic ships' dimensions of tankers, bulkers, LNG-carriers and containerships. In the end of the paper the calculated coefficients and charts of the dependencies are represented.

Key words: terminal design, seaport, ships, ships' dimensions, regression analysis, ship dimensions model, port sea area, ships' design theory.

For citation: Aleksandr L. Kuznetsov, Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, The choice of approximation function of ships' dimensions for the purposes of seaport design. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 265—271.

Введение

Проектирование морского порта невозможно без информации о характеристиках планируемых к обслуживанию судов. При этом на первоначальных этапах проектирования имеется только частичная информация о составе и характеристиках судов. В связи с этим, в отечественной и зарубежной литературе приводятся справочные статистические зависимости размерений морских судов от их дедвейта. Впервые подобные характеристики были введены в практику проектирования морских портов руководством UNCTAD в 1985 г. [1]. Примеры соответствующих зависимостей из данного документа приведены на рис. 1-3.

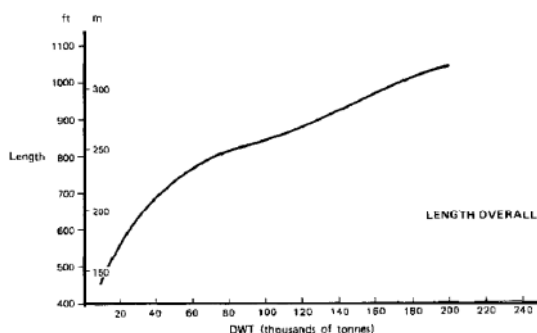


Рис. 12. Длина балкерных судов в зависимости от дедвейта согласно UNCTAD

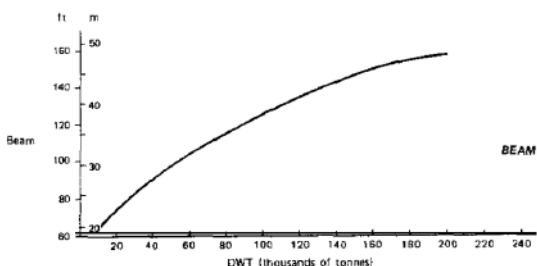


Рис. 13. Ширина балкерных судов в зависимости от дедвейта согласно UNCTAD

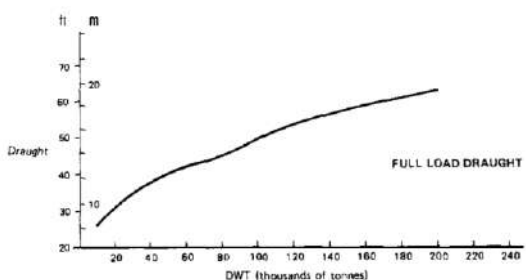


Рис. 14. Осадка балкерных судов в зависимости от дедвейта согласно UNCTAD

Например, в качестве эмпирического правила для оценки осадки судна в этом издании предлагается использовать зависимость $D = \sqrt{DWT} + 5$ где DWT – дедвейт судна, измеренный в тыс. т. (например, для судна дедвейтом 100 тыс. т $D = \sqrt{DWT} + 5 = 15$ м).

Более свежие данные для балкерных судов, основанные на обширной мировой статистике, можно

найти в работе [2]. Эти зависимости представлены на рис. 4–6.

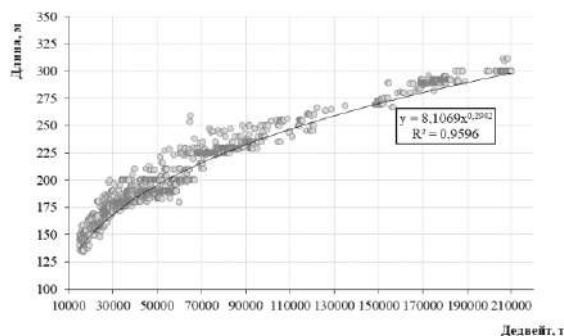


Рис. 15. Аппроксимация длины балкерного судна как функции от дедвейта

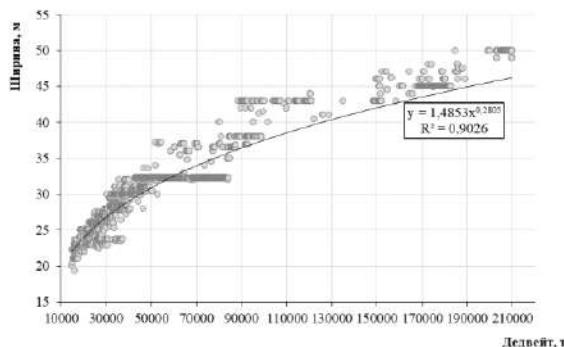


Рис. 16. Аппроксимация ширины балкерного судна как функции от дедвейта

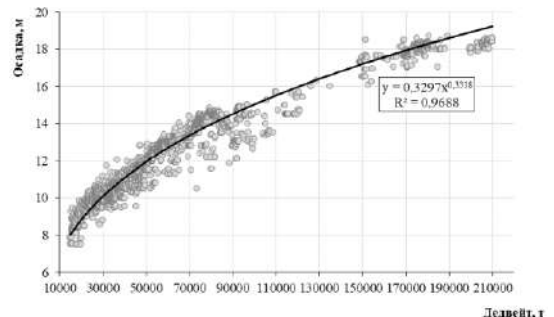


Рис. 17. Аппроксимация осадки балкерного судна как функции от дедвейта

В основном нормативном документе проектировщиков портов, в части расчета параметров акватории СП 444.1326000.2019 «Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования» приводятся только некоторые точки из представленной на графике статистики [3-4]. Вообще, подобные зависимости обычно строятся аппроксимацией статистических данных с помощью метода наименьших квадратов [5-6]. Особенное влияние на точность и адекватность таких методов оказывает выбор конкретной формы аппроксимирующей функции [7-8]. Как можно видеть из рисунков, зависимость габаритных характеристик судна заставляет предполагать в качестве такой зависимости степенную функцию:

$$y = a \cdot x^b$$

В то же время, в простейшей форме метод наименьших квадратов обычно используется для линейных функций. В связи с этим, при построении эмпирических зависимостей переходят от степенной формы к линейной путем логарифмирования левой и правой частей равенства:

$$\ln y = \ln(a \cdot x^b) = \ln a + b \cdot \ln x$$

К этому выражению уже легче применять метод наименьших квадратов, основной задачей которого является подбор параметров a и b , минимизирующих сумму квадратов разностей между модельными и фактическими значениями:

$$\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \rightarrow \min$$

где \hat{y}_i – расчетное значение оцениваемого показателя;

y_i – фактическое значение показателя;

N – количество элементов в статистической выборке.

В то же время, указанный подход используют тогда, когда конкретная форма зависимости точно неизвестна или слишком сложна для быстрой оценки. Однако, анализ данных о размерениях судов и сопоставление получаемых с помощью метода наименьших квадратов зависимостей заставляют предположить, что приводимые характеристики судов не являются независимыми друг от друга. В данной работе приводится обоснование формы зависимости, свойственной всем грузовым судам.

Методы и материалы

Если на статистических данных рассмотреть отношение длины судна к его осадке $\frac{L}{D}$ и ширины судна к его осадке $\frac{B}{D}$ для разных значений дедвейта DWT , то их значения остаются относительно постоянными (рис. 7).

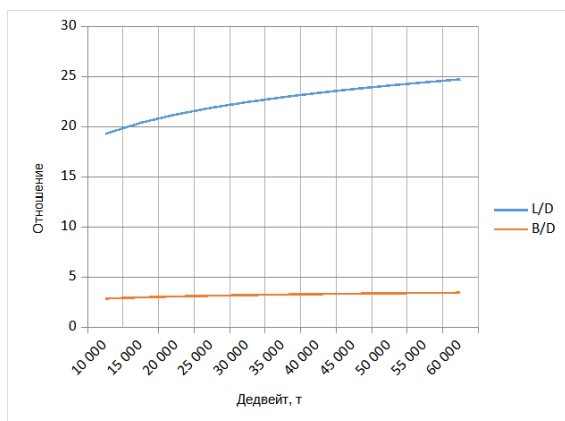


Рис. 18. Отношение длины и ширины судна к осадке как функции дедвейта

Если вычислить условный внешний объем погруженной части корпуса судна как произведение длины, ширины и осадки судна: $V = L \cdot W \cdot D$, то отношение $k = \frac{DWT}{V} < 1$ по смыслу близко к коэффициенту объемной полноты корпуса судна, который стремится к некоторой постоянной величине с ростом дедвейта (рис. 8).

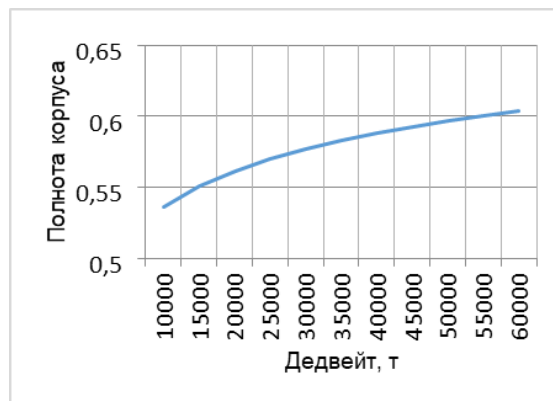


Рис. 19. Полнота корпуса балкерного судна как функция от дедвейта

Действительно, с ростом дедвейта судна геометрическая форма его погруженной части все более приближается к параллелепипеду, поскольку скосы бортов и оконечностей начинают играть относительно меньшую роль. Достаточно типична и зависимость относительного удлинения корпуса судна от дедвейта (рис. 9).

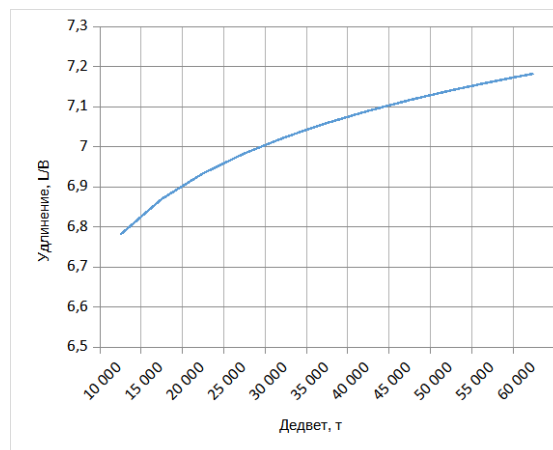


Рис. 20. Изменение относительного удлинения от дедвейта судна

Чтобы более ясно представить себе внутреннюю связь рассматриваемых параметров, следует обратиться к некоторым положениям теории устройства судна.

Конструктивные размерения судна связаны с его дедвейтом известным соотношением $(l \cdot b \cdot d) \cdot k_1 = DWT$, где k_1 есть коэффициент общей полноты корпуса. Это иллюстрирует рис. 10.

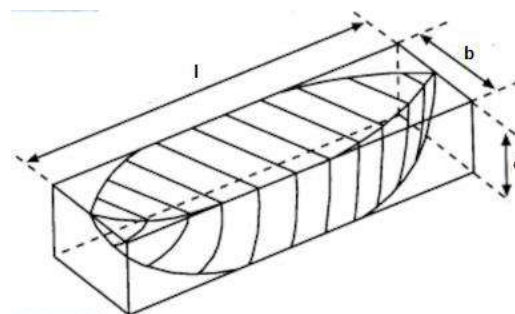


Рис. 21. Конструктивные размерения подводной части корпуса судна

Очевидно, что наибольшие размерения связаны с дедвейтом судна некоторым близким коэффициентом $k \leq k_1$, или $(L \cdot B \cdot C) \cdot k = DWT$, учитывающим превышения наибольших размерений над конструктивными (рис. 11).

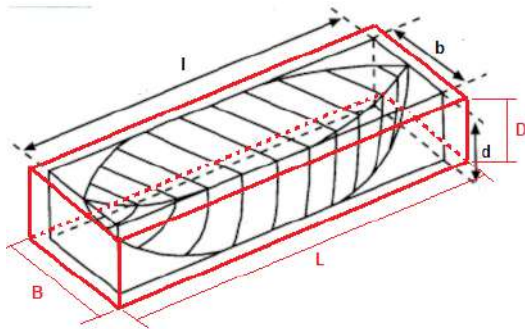


Рис. 22. Прямоугольник с размерами наибольших размерений

Для каждого типа судна размерения находятся в более-менее постоянном соотношении $L:B:D = c:b:a$, или $L = x \cdot c; B = x \cdot b; D = x \cdot a$. Следовательно, $a \cdot b \cdot c \cdot k \cdot x^3 = DWT$, откуда $x = \sqrt[3]{\frac{DWT}{a \cdot b \cdot c \cdot k}}$. Величину $f = \sqrt[3]{\frac{1}{a \cdot b \cdot c \cdot k}}$ назовем конструктивным фактором, тогда $L = c \cdot f \cdot \sqrt[3]{DWT}$; $B = b \cdot f \cdot \sqrt[3]{DWT}$; $D = a \cdot f \cdot \sqrt[3]{DWT}$

Полученные соотношения позволяют искать аппроксимацию статистических данных обо всех размерениях не в форме $y = \alpha \cdot x^\beta$, а в более простом виде $y = A \cdot \sqrt[3]{DWT}$. Найденное подобной аппроксимацией соотношение для длины даст значение $A_L = c \cdot f$, для ширины $A_B = b \cdot f$, для осадки $A_D = a \cdot f$, откуда $\frac{A_L}{A_B} = \frac{c}{b}$ и $\frac{A_B}{A_D} = \frac{b}{a}$, или $A_L:A_B:A_D = c:b:a$.

Поскольку аппроксимация размерений дает три уравнения для четырех неизвестных a, b, c, k , без потери общности положим $a = 1$ (это равносильно тому, что все размерения будут отсчитываться в единицах осадки D).

Тогда, очевидно, имеем $A_D = f$; $A_B = b \cdot A_D$ или $b = \frac{A_B}{A_D}$; аналогично $c = \frac{A_L}{A_D}$. Поскольку $f = A_D = \sqrt[3]{\frac{1}{a \cdot b \cdot c \cdot k}}$, то $k = \frac{1}{a \cdot b \cdot c \cdot A_D^3}$. Таким образом, аппроксимация имеющихся статистических данных позволяет составить полное представление о типичных значениях характеристики судова, b, c и f как интегрального параметра.

Пусть, например, в результате аппроксимации статистических данных, показанных на рис. 12-14, получены значения $A_D = 0,3246$; $A_B = 0,8168$; $A_L = 5,3211$. Тогда $f = A_D = 0,3376$; $a = 1$; $b = \frac{0,8168}{0,3246} = 2,5166$; $c = \frac{5,3211}{0,3246} = 16,3943$; $k = 0,7089$.

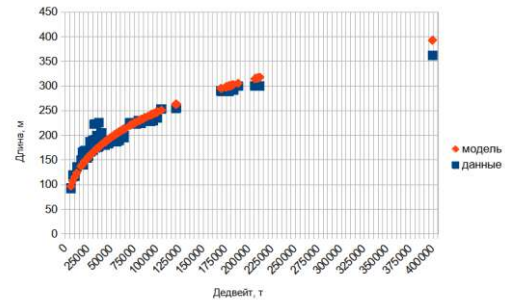


Рис. 23. Пример статистических данных по длине судов и их аппроксимации

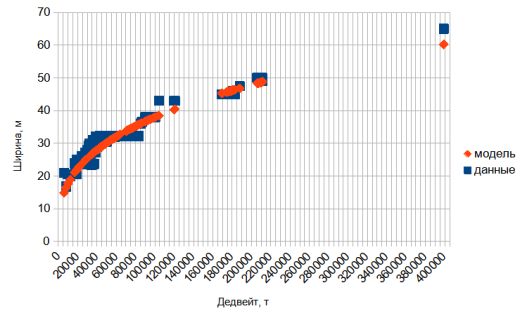


Рис. 24. Пример статистических данных по ширине судов и их аппроксимации

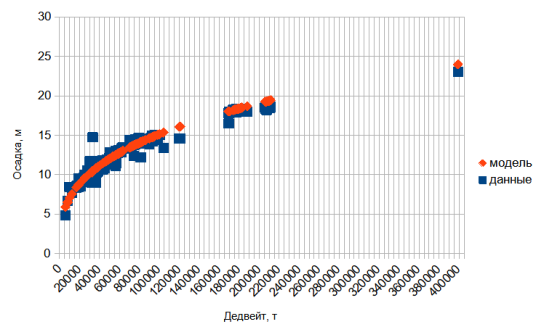


Рис. 25. Пример статистических данных по осадке судов и их аппроксимации

Рассчитанные по предлагаемым формулам значения показаны на рис. 15.

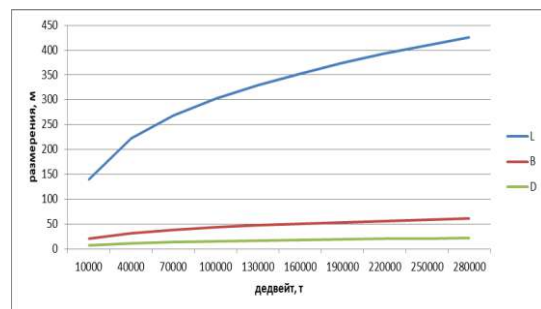


Рис. 26. Значения размерений по функциональным зависимостям

Еще одной часто публикуемой зависимостью является контейнеровместимость судна как функция дедвейта. На первый взгляд, она представляется линейной, поскольку чистый грузовой дедвейт $DWT_{гр} = DWT - D_0$ позволяет, при известном среднем весе w_{teu} условного TEU позволяет рассчитать ее как $E_{teu} = \frac{DWT_{гр}}{w_{teu}}$.

Следует учитывать, однако, что топливная эффективность судовой установки обуславливает нелинейную зависимость бункеровочных запасов $D_0 = \alpha \cdot DWT^\beta$ (рис. 16).

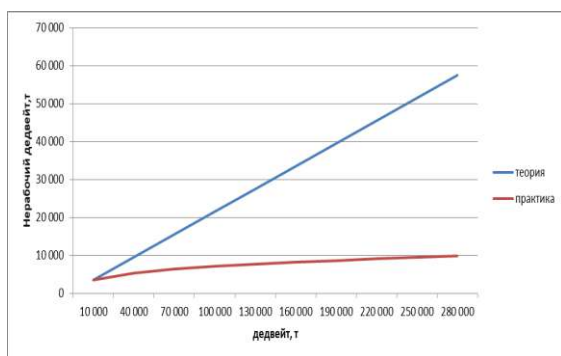


Рис. 27. Зависимость постоянной составляющей дедвейта от его величины

Как следствие, контейнеровместимость также становится нелинейной функцией дедвейта $E_{teu} = \frac{DWT_{гр}}{w_{teu}} = \frac{DWT - D_0}{w_{teu}} = \frac{DWT - DWT^\beta}{w_{teu}}$ (рис. 17).

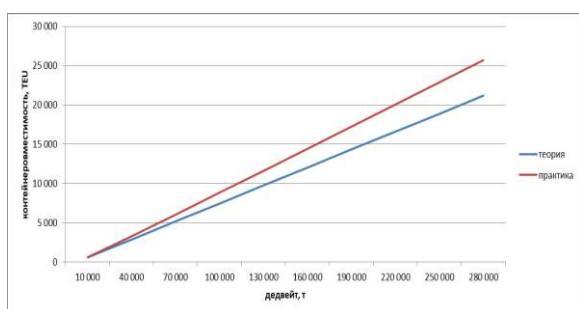


Рис. 28. Контейнеровместимость как функция дедвейта контейнерного судна

Результаты

Поскольку форма аппроксимирующей зависимости между каждым размерением судна и дедвейтом имеет вид $y = \alpha \cdot \sqrt[3]{x} = \alpha \cdot x^{\frac{1}{3}}$, то для нахождения коэффициента достаточно рассчитать среднее значение $\alpha = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sqrt[3]{x_i}}$. Выполнение подобных расчетов, гораздо проще представленных выше логарифмических преобразований, и не требует применения специализированного программного обеспечения. Кроме того, представленная зависимость может быть использована для любого типа судов.

При описании предлагаемого метода в качестве иллюстрации использовались данные, полученные для контейнерных судов. На рис. 18-20 представлены соответствующие зависимости для типовых классов судов.

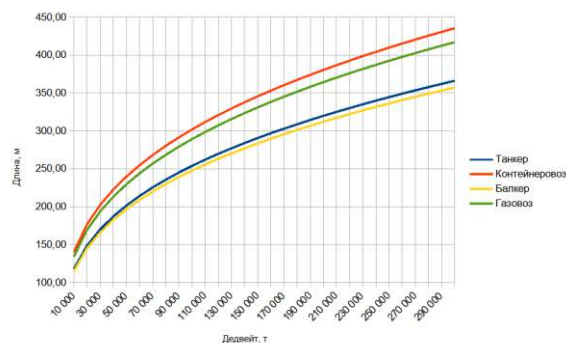


Рис. 29. Зависимость длины судов различного класса от дедвейта

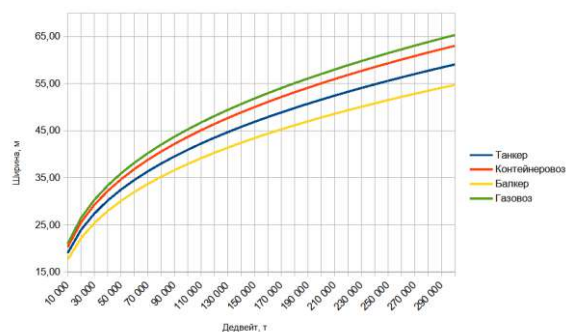


Рис. 30. Зависимость ширины судов различного класса от дедвейта

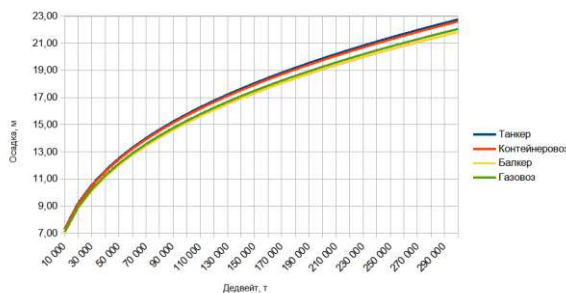


Рис. 31. Зависимость осадки судов различного класса от дедвейта

Анализ статистических данных, проведенный с помощью предлагаемого метода, дает значения A_D, A_B, A_L (табл.1), позволяющие вычислить f, c, b и k (табл. 2).

Таблица 1

Тип судна	A_L	A_B	A_D
Танкер	5,4687	0,8827	0,3399
Контейнеровоз	6,5048	0,9419	0,3376
Балкер	5,3360	0,8177	0,3260
Газовоз	6,2295	0,9760	0,3294

Таблица 2

Тип судна	Танкер	Конт.	Балкер	Газовоз
a	1	1	1	1
b	2,6215	2,8035	2,5166	3,0542
c	16,3575	19,3714	16,3943	19,6294
k	0,622	0,4859	0,7089	0,5186
f	0,3347	0,3359	0,3246	0,318

Заключение

1. Публикуемые в профессиональной периодической печати статистические данные о характеристиках морских торговых судов оцениваются и интерпретируются вне связи с теоретическими конструктивными параметрами судна.

2. В работе было доказано, что зависимость таких параметров судна, как длина, ширина и осадка, определяются конструктивными свойствами судна.

3. Эта зависимость имеет степенную форму: $y = k \cdot DWT^{\frac{1}{3}}$, где DWT – дедвейт судна в тоннах, а k – эмпирический коэффициент, определяемый на основании анализа статистических данных о размерах судов.

4. Проведенное исследование не претендует на открытие новых закономерностей, но

использование известных положений теории судна позволяет предложить более точные аппроксимирующие зависимости и установить объективные соотношения при их интерпретации.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании морских портов для интерполяции и экстраполяции данных о параметрах новых, еще не построенных судов, а также при интерполяции в отсутствующих статистических диапазонах.

6. Полученные зависимости и использованные в исследовании данные так же позволяют разработать интерактивную базу данных морских судов, в которой поиск проектных судов осуществляется на основании графика зависимостей длины судна от дедвейта.

7. Сформулированные зависимости и построенные графики позволят повысить эффективность проектирования морских судов за счет сокращения времени на поиск информации об определенном судне.

8. На стадии предпроектных расчетов для этих целей вместо конкретных судов могут использоваться графики зависимостей размерений судна от его дедвейта, а на стадии проекта может быть использована база данных, которая позволяет быстро найти проекты судов наиболее близких по дедвейту

Литература

1. "Port design. A handbook for planners in developing countries" – UNCTAD, Geneva, 1985, p. 227.
2. Купцов Н. В. Исследование актуальных размерений балкеров для технологического проектирования морских портов / Николай Владимирович Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.
3. СП 444.1326000.2019 «Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563687338> (дата обращения: 03.09.2022).
4. Кузнецов А. Л. Направление совершенствования норм технологического проектирования морских портов / Александр Львович Кузнецов, Адам Михайлович Сампиев, Антон Денисович Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2022. - №2(72). - С. 157-168. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-157-168
5. Park N. K., Suh S. C. Tendency toward mega containerhips and the constraints of container terminals // Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – V. 7. – I. 5. – P. 131.
6. Kristensen H. O. Statistical analysis and determination of regression formulas for main dimensions of container ships based on IHS Fairplay data // University of Southern Denmark: Odense, Denmark. – 2013, p. 12.
7. Ekinci, S., Celebi, U. B., Bal, M., Amasyali, M. F., & Boyaci, U. K. (2011). Predictions of oil/chemical tanker main design parameters using computational intelligence techniques. Applied Soft Computing, 11(2), 2356–2366. doi:10.1016/j.asoc.2010.08.015
8. Кузнецов А. К. Оценка производительности причала для целей имитационного моделирования / Кузнецов А. Л., Галин А. В., Семенов А. Д., Виноградова Э. В. // Морские интеллектуальные технологии. - № 1 том 1, 2020 – с. 140-144.

References

1. "Port design. A handbook for planners in developing countries" – UNCTAD, Geneva, 1985, p. 227.
2. Kuptsov N. V. Issledovanie aktual'nyh razmerenij balkEROV dlja tehnologicheskogo proektirovanija morskikh portov [The review of relevant bulkers' dimensions for the purposes of seaports' technological design] / Nikolaj Vladimirovich Kuptsov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. - 2017. - №2(42). - С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.
3. SP 444.1326000.2019 «Normy proektirovanija morskikh kanalov, farvaterov i zon manevrirovaniya» [The rules of sea channels, waterways and maneuvering area design]. [Elektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/563687338> (data obraschenija: 03.09.2022).
4. Kuznetsov A. L. Napravlenie sovershenstvovanija norm tehnologicheskogo proektirovanija morskikh portov [The ways to improve the rules of seaports technological design] / Aleksandr L'vovich Kuznetsov, Adam Mihajlovich Sampiev, Anton Denisovich Semenov // Vestnik Gosu-darstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. - 2022. - №2(72). - С. 157-168. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-157-168.

5. Park N. K., Suh S. C. Tendency toward mega containerhips and the constraints of container terminals //Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – V. 7. – I. 5. – P. 131.
6. Kristensen H. O. Statistical analysis and determination of regression formulas for main dimensions of container ships based on IHS Fairplay data // University of Southern Denmark: Odense, Denmark. – 2013, p. 12.
7. Ekinci, S., Celebi, U. B., Bal, M., Amasyali, M. F., & Boyaci, U. K. (2011). Predictions of oil/chemical tanker main design parameters using computational intelligence techniques. Applied Soft Computing, 11(2), 2356–2366. doi:10.1016/j.asoc.2010.08.015
8. Kuznetsov A. K. Otsenka proizvoditel'nosti prichala dlja tselej imitatsionnogo modelirovaniya [Evaluation of quay productivity for the purposes of simulation modelling / Kuznetsov A. L., Galin A. V., Semenov A. D., Vinogradova E. V. // Morskie intellektual'nye tehnologii. - № 1 tom 1, 2020 – s. 140-144.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Львович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Александр Викторович Кириченко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры портов и грузовых терминалов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: KirichenkoV@gumrf.ru

Антон Денисович Семенов, аспирант, научный руководитель – Кузнецов Александр Львович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Aleksandr L. Kuznetsov, professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Aleksandr V. Kirichenko, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Ports and Cargo Terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Anton D. Semenov, postgraduate, scientific advisor – Kuznetsov Aleksandr L., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: asemyonov054@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.053>

Метод расчета суммарных потерь на распространение звука в режиме разнесенного излучения и приема

В.А. Пятакович¹ e-mail: pva.877com@mail.ru, А.М. Василенко¹ e-mail: kahunya@gmail.com,
В.Ф. Рычкова² e-mail: rychkova@msun.ru

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. В статье представлен метод расчета суммарных потерь на распространение звука по двум взаимно пересекающимся секторам. Предложенный метод позволяет оценить практические возможности гидроакустических средств, работающих в режиме разнесенного излучения и приема, а также обосновать размещение активных и пассивных элементов системы обнаружения признаков полей объектов в морской среде. Метод разработан на базе математического моделирования процессов распространения звуковых волн в морской среде и статистического анализа информации о гидролого-акустической обстановке. Алгоритмическая основа расчета параметров гидроакустического поля в двумерно-неоднородном канале распространения звука, с контролем критериев применимости лучевой теории, позволяет учесть изменчивость вертикального распределения скорости звука, рельеф дна вдоль трассы распространения сигналов, волнение поверхности моря, акустические свойства грунта. Приведены результаты расчета суммарных потерь на распространение звука для полигона, расположенного в северо-западной части Тихого океана.

Ключевые слова: акустические свойства грунта, расчет параметров гидроакустического поля, критерии применимости лучевой теории, суммарные потери на распространение звука, режим разнесенного излучения и приема сигналов, распространение звуковых волн в морской среде.

Для цитирования: Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Метод расчета суммарных потерь на распространение звука в режиме разнесенного излучения и приема, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 272—278.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.053>

Method for calculating the total loss for sound propagation in the mode of spaced radiation and reception

Valeriy A. Pyatakovich¹ e-mail: pva.877com@mail.ru, Anna M. Vasilenko¹ e-mail: kahunya@gmail.com
Victoria F. Rychkova² e-mail: rychkova@msun.ru

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Vladivostok. Russian Federation,

²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, Vladivostok. Russian Federation

Abstract. The article presents a method for calculating the total losses for the propagation of sound in two mutually intersecting sectors. The proposed method makes it possible to evaluate the practical capabilities of hydroacoustic devices operating in the mode of spaced radiation and reception, as well as to justify the placement of active and passive elements of the system for detecting signs of fields of objects in the marine environment. The method is developed on the basis of mathematical modeling of sound wave propagation processes in the marine environment and statistical analysis of information about the hydro-acoustic environment. The algorithmic basis for calculating the parameters of the hydroacoustic field in a two-dimensional inhomogeneous sound propagation channel, with the control of the criteria for the applicability of the beam theory, allows us to take into account the variability of the vertical distribution of the speed of sound, the bottom relief along the signal propagation route, sea surface waves, acoustic properties of the soil. The results of calculating the total sound propagation losses for a test site located in the northwestern Pacific Ocean are presented.

Key words: acoustic properties of the soil, calculation of the parameters of the hydroacoustic field, the criteria for the applicability of the beam theory, the total loss of sound propagation, the mode of spaced radiation and signal reception, propagation of sound waves in the marine environment.

For citation: Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Method for calculating the total loss for sound propagation in the mode of spaced radiation and reception, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 272—278.

Введение

Задача расчета потерь на распространение звука для гидроакустических средств, работающих в режиме разнесенного излучения –приема (РИП), существенно усложняется. В первом приближении,

оценка дальности действия гидроакустических средств [1] может быть произведена с применением существующих методик расчета гидроакустических полей путем суммирования потерь на распространение звука (ПР) по общим точкам пространства.

Применение гидроакустических средств и оценка их практических возможностей в значительной степени зависят от гидролого-акустических параметров среды [2, 3] таких как: изменчивость вертикального распределения скорости звука, рельеф дна вдоль трассы распространения сигналов, волнение поверхности моря.

Модели данных о поле скорости звука

В качестве исходных данных о поле скорости звука, как основного влияющего фактора на условия распространения сигналов в морской среде, использовались две известные модели.

Первая – статистическая климатическая модель вертикального распределения скорости звука [4], основанная на многолетних гидрологических наблюдениях в районах Тихого Океана и описывающая пространственно-временную область наборами типичных кривых.

Вторая модель обеспечивает данными о поле скорости звука путем применения метода эмпирических ортонормальных функций.

Метод эмпирических ортонормальных функций позволяет оптимизировать анализ массивов данных по Мировому океану, содержащихся в национальных, региональных и ведомственных центрах океанографических данных. Поле скорости звука в этом случае может быть представлено совокупностью нормированных профилей скорости звука на регулярной сетке географических координат (поле норм).

Оценка составляющих вторичного гидроакустического поля морского технического объекта

С точки зрения гидролокации корабль представляет собой подкрепленную набором тонкую звукопрозрачную оболочку наружного корпуса, внутри которой находятся совокупности других отражающих элементов различной формы и размеров. К этим элементам относятся: прочный корпус, межкорпусной набор, выгородки, антенны ГАС и т.д. Вторичное гидроакустическое поле морского технического объекта, в рассматриваемом случае - морской цели (МЦ), формируется за счет взаимодействия корпусных конструкций с падающей звуковой волной. Вторичное гидроакустическое поле может быть представлено в виде трех составляющих – зеркальной, диффузной, и незеркальной.

Основными источниками формирования зеркальной составляющей являются отражения звуковой энергии от: обшивки наружного корпуса и его элементов; прочного корпуса подводного объекта; крупногабаритных конструкций, расположенных снаружи корпуса; элементов межкорпусного набора. На высоких частотах локации или при больших толщинах корпуса уровень зеркальной составляющей в основном определяется размерами и внешними обводами корпуса. Само название зеркальной составляющей предполагает, что законы отражения звуковой энергии подчиняются законам оптики. Зеркальная составляющая когерентна. Она формируется зеркально отражающими элементами МЦ с учетом коэффициентов отражения путем энергетического суммирования.

Основными источниками формирования

диффузной составляющей является рассеивание звуковой энергии на: многочисленных мелких элементах корпусного набора, расположенных за обшивкой наружного корпуса и его выступающих частях; акустически неоднородных частях обшивки наружного корпуса (подкрепления, приварыши, стыковые швы и т. д.); акустически неоднородных частях акустических покрытий; пузырьковой пелене в пограничном слое у корпуса и в кильватерной струе.

Все эти причины вызывают отражение сигнала гидролокатора под равномерными углами, т.е. создается диффузное поле, которое не имеет направленности. При отсутствии акустических покрытий на наружном корпусе основным источником диффузного отражения являются на низких частотах локации – рассеивание звуковой энергии на элементах межкорпусного набора, а на высоких частотах – рассеивание на неоднородностях обшивки наружного корпуса. При наличии акустических покрытий на наружном корпусе диффузное отражение формируется за счет рассеивания звуковой энергии на элементах межкорпусного набора и неоднородностях покрытий.

При движении МЦ со скоростями хода выше 12–14 уз диффузная составляющая определяется рассеиванием звуковой энергии на пелене пузырьков. Незеркальная составляющая вторичного гидроакустического поля обусловлена упругими колебаниями обшивки корпуса и шпангоутов под воздействием падающей звуковой волны. Такие колебания корпусных конструкций приводят к излучению акустической энергии, что увеличивает отраженный сигнал в приемнике гидролокатора. Уровень незеркального отражения увеличивается с увеличением толщины обшивки и частоты локации.

Наиболее полной исходной характеристикой шумности надводных кораблей и подводных лодок, на основе которой может быть проведена их объективная сравнительная оценка во всем диапазоне частот, являются спектрограммы подводного шума. Однако в некоторых случаях, особенно при оперативно-тактических расчетах, трудно использовать спектрограммы. В оценке эффективности и расчетах дальности действия гидроакустических комплексов [5] целесообразнее использовать так называемые приведенные значения подводного шума.

Существующие специальные методики определения приведенных значений, базируются на данных о конкретных корабельных гидроакустических комплексах стоящих на вооружении стран НАТО кораблей. Приведенными параметрами служат некоторые условные уровни шумности, пересчитанные к стандартным условиям по определенным правилам. За стандартные условия в нашей стране и в странах НАТО приняты – частота 1 кГц, полоса частот 1 Гц, расстояние от МЦ 1м. Необходимость разработки специального способа приведения обусловлена следующими факторами: спектр подводного шума МЦ занимает широкий интервал частот и спадает в звуковом диапазоне с интенсивностью 6 дБ/октаву; спектр содержит значительное количество дискретных составляющих в инфразвуковом и низком звуковом диапазоне частот; различными частотными диапазонами работы неконтактных систем оружия (НСО) и средств обнаружения; уровни подводного

шума и вид спектра зависят от полосы анализа и расстояния при измерениях.

Методики определяют приведенные уровни шума исходя из максимальной дальности обнаружения гидроакустическими комплексами, по конкретным поддиапазнам их работы и с конкретными уровнями помех.

Таким образом, уровень вторичного гидроакустического поля подводного объекта (ПО) зависит от форм обводов и конструктивных особенностей корпуса и выступающих элементов, а также от применяемых противогидролокационных покрытий. Поэтому знание особенностей формирования вторичного гидроакустического поля и умение производить расчетную оценку отражающей способности ПО в процессе их проектирования дает возможность уменьшить эти параметры путем рационального изменения форм обводов и конструкции корпуса, рационального использования противогидролокационных покрытий. Методика справедлива для диапазона частот локации от 3 до 30 кГц.

Суммарные потери при распространении звука и вероятностная мера, характеризующая стохастичность ситуации обнаружения

Дальность действия, в качестве показателя эффективности использования гидроакустических средств в режиме РИП, может быть получена на основе известного уравнения гидролокации, которое упрощенно запишем в виде:

$$ПУ = ПР_1 + ПР_2 \quad (1)$$

где: ПУ – пороговый уровень обнаруживаемого сигнала (дБ); $ПР_1$ и $ПР_2$ - потери при распространении звука прямого и отраженного сигналов соответственно (дБ).

В дальнейших рассуждениях будем полагать, что степень стохастичности процесса обнаружения сигнала может быть отнесена на правую часть уравнения (1). При этом набору значений суммарного уровня потерь на распространение ($ПР_1 + ПР_2$) соответствует вероятностная мера, характеризующая стохастичность ситуации обнаружения.

Вероятностная мера для первичных и вторичных ПР может быть сформирована, исходя из вероятностно-статистического описания параметров канала распространения звука в заданном районе по данным многолетних гидрологических наблюдений аналогично работам [3, 4]. Определение вероятностной меры суммарных ПР в узловых точках можно производить в предположении, что ПР прямого и отраженного сигналов на фиксированных дистанциях имеют равномерное распределение на интервалах, задания стандартизованного описания эмпирической функции распределения, а климатической нормой ПР является медиана.

В общем случае, при произвольном расположении в пространстве излучателя, приемника и объекта [6], определение суммарных потерь на распространение невозможно вне рассмотрения геометрии конкретной тактической ситуации.

Для наиболее простого частного случая использования режима РИП, когда условия распространения звука описываются плоско-слоистым волноводом, поле суммарных потерь на

распространение является цилиндрически симметричным и определяется сложением $ПР_1$ и $ПР_2$ на заданном расстоянии так же, как в традиционной гидролокации. Границы зон освещенности представляют собой концентрические окружности с центром в точке излучения – приема.

В пространственно-неоднородном волноводе (береговой клин, анизотропное поле скорости звука и т.д.) при фиксированных точках расположения источника и приемника звука (стационарные системы - режим РИП), в общем случае, потери на распространение должны быть оценены для каждой точки расположения объекта. Исходя из предположения о соблюдении принципа взаимности при распространении звука (интенсивность звукового поля не изменяется при взаимной перестановке источника и приемника звука), для оценки зон освещенности предлагался метод расчета суммарных потерь на распространение по двум взаимно пересекающимся секторам.

Метод расчета суммарных потерь на распространение звука по двум взаимно пересекающимся секторам

Расчет потерь на распространение как в первичном ($ПР_1$), так и во вторичном звуковом поле ($ПР_2$) будем производить в двумерно-неоднородном волноводе с учетом изменчивости вертикального распределения скорости звука, рельефа дна вдоль трасс распространения сигналов, волнения поверхности моря, акустических свойств грунта.

Сущность метода заключается в оценке суммарных потерь на распространение звука для узлов расчетной сетки, расположенных в пространственной области, представляющей интерес для решения конкретной практической задачи. Выражения для расчета дистанций от источника (приемника) до узловых точек, а также их географического положения хорошо известны из курса кораблевождения.

Для сокращения вычислительных процедур, с учетом принципа взаимности, расчеты акустического поля выполняются на трассах, проведенных из источника и приемника звука для каждого горизонта маневрирования объекта отдельно. Точки пересечения трасс являются узлами расчетной сетки, как это показано на рис. 1. Фиксированное расположение источника и приемника звука, заданные азимутальные направления трасс позволяют учесть реальный характер изменения рельефа и отражательных свойств дна, а также определить горизонтальное расстояние по трассе до каждого узла расчетной сетки.

Сначала значения потерь при распространении звука, рассчитанные по каждому из взаимно пересекающихся секторов (веер трасс от источника и веер трасс от приемника), приводятся к географическим координатам на нерегулярной сетке координат. Далее они подвергаются процедуре кригинг-интерполяции для получения прямоугольно-регулярной сетки географических координат.

Затем производится экспорт данных по точкам общей области для каждого сектора и суммирование значений потерь при распространении в общих узлах сетки. Полученный двумерный массив суммарных значений потерь при распространении звука характеризует условия обнаружения объектов в

заданном районе.

$(\text{ПР}_{ij}^{(S)})$ – массив значений потерь при распространении звука, рассчитанных по вееру трасс от источника, для радиально-регулярной сетки координат.

$(\text{ПР}_{ij}^{(R)})$ – массив значений потерь при распространении звука, рассчитанных по вееру трасс от приемника, для радиально-регулярной сетки координат.

$(\text{ПР}_{ij}^{(S)}) \rightarrow (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(S)})$ – преобразование массива значений потерь при распространении звука, рассчитанных по вееру трасс от источника, к

прямоугольной регулярной сетке географических координат.

$(\text{ПР}_{ij}^{(R)}) \rightarrow (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(R)})$ – преобразование массива значений потерь при распространении звука, рассчитанных по вееру трасс от приемника, к прямоугольной регулярной сетке географических координат.

$(\widehat{\text{ПР}}_{ij}) = (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(S)}) + (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(R)})$ – массив суммарных значений потерь при распространении звука по точкам общей области, представляющей интерес для решения конкретной практической задачи.

$$(\widehat{\text{ПР}}_{ij}) = (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(S)}) + (\widehat{\text{ПР}}_{ij}^{(R)}), \quad (2)$$

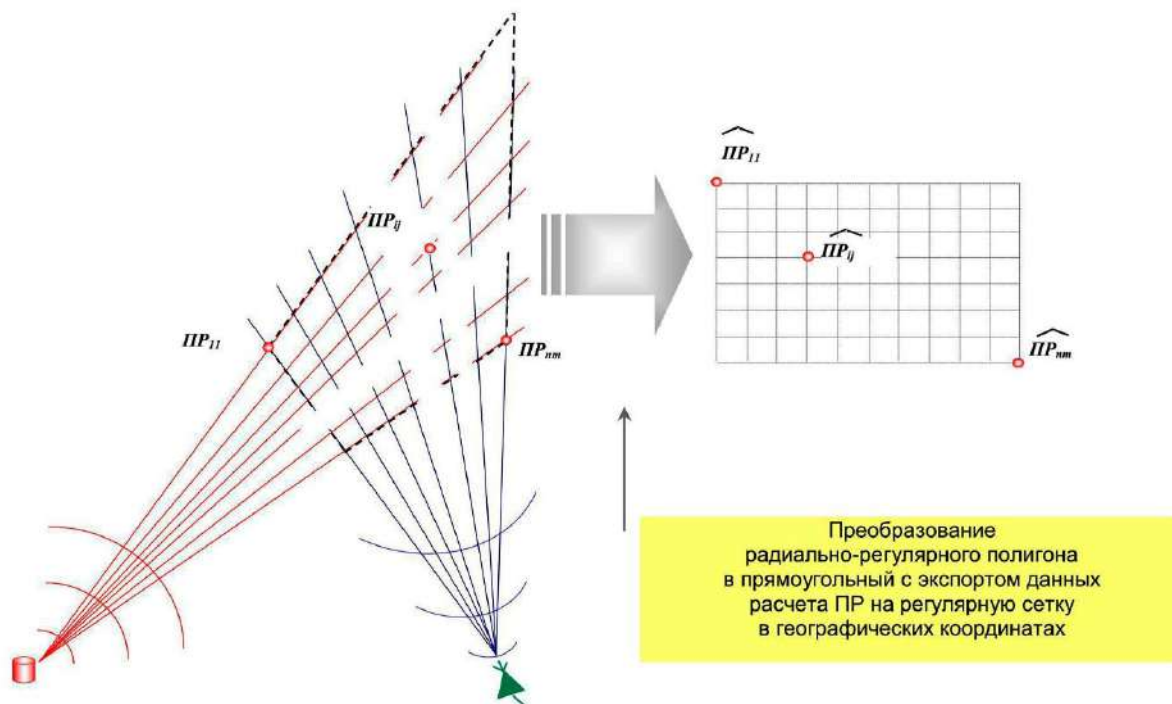


Рис. 1. Геометрический аспект метода расчета суммарных потерь на распространение звука (ПР) в режиме разнесенного излучения - приема

Результаты исследования

На рис. 2 приведен результат расчета суммарных потерь на распространение звука согласно формуле (2) для полигона, расположенного в северо-западной части Тихого океана [7, 8]. Общая площадь полигона составляет примерно 25000 км². Глубина расположения приемной антенны при расчетах принималась 200 м, объект располагался на глубине 150 м.

Изолинии суммарных потерь при распространении звука, соответствующие заданному значению порогового уровня из уравнения (1), определяют границы зон освещенности на заданном горизонте и могут быть нанесены на карту рассматриваемого района.

Совокупность карт зон освещенности для практически важных глубин маневрирования объекта, позволяют достаточно полно охарактеризовать практические возможности (поисковый потенциал) гидроакустических средств,

работающих в режиме РИП, а также обосновать оптимальное размещение активных и пассивных элементов системы обнаружения признаков полей объектов. Применение процедуры кригинг-интерполяции позволяет отобразить результаты расчета суммарных потерь на распространение звука по точкам общей области, представляющей интерес для решения конкретной практической задачи, в трехмерном виде.

Заметим, что при анализе условий обнаружения в прибрежной зоне необходим учет погрешности, связанной с искривлением траекторий звуковых лучей в горизонтальной плоскости, распространяющихся по направлениям, не совпадающим с «ребром» берегового клина. Для учета такой погрешности необходимо сравнение расчетных данных с результатами экспериментальной акустической калибровки района.

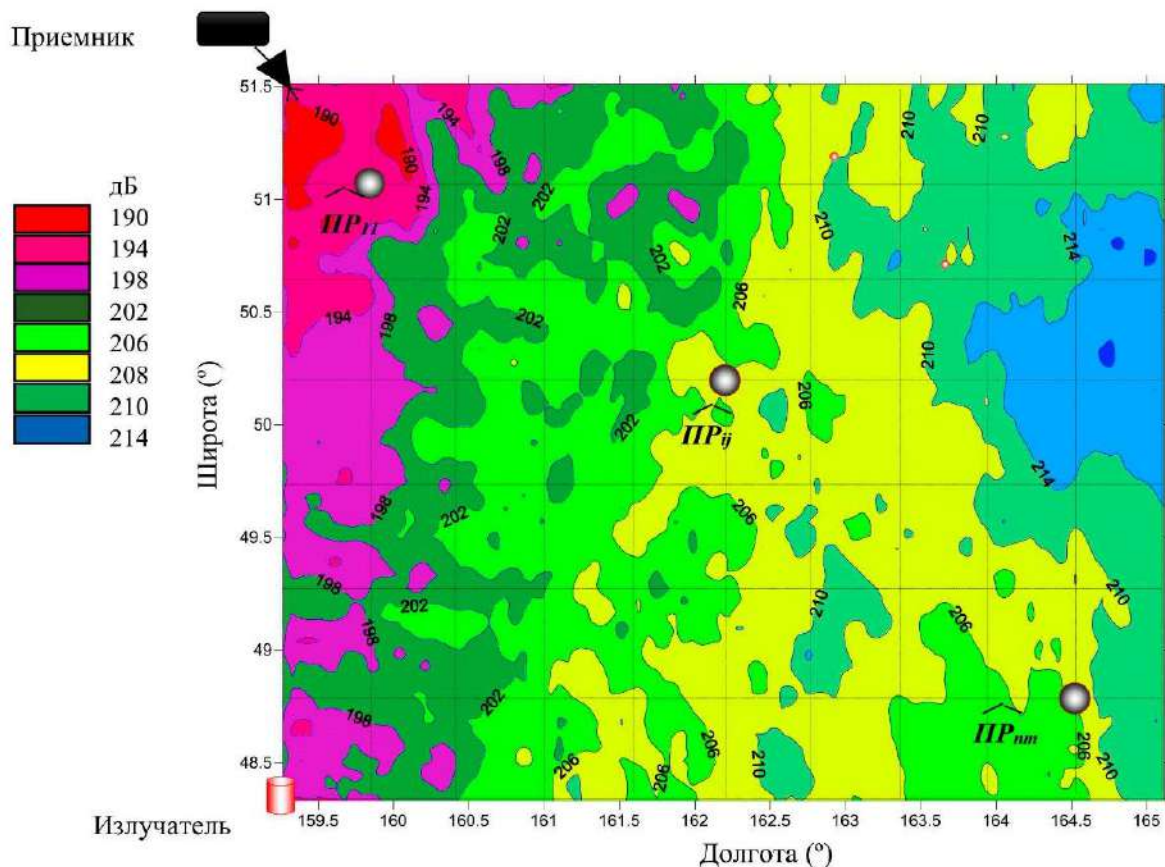


Рис. 2. Результат оценки поля суммарных потерь на распространение звука в северо-западной части Тихого океана

При импульсном характере излучения на некоторых дистанциях оценки уровня звукового поля могут оказаться завышенными до 3...6 дБ. Это объясняется за счет различия по времени прихода отдельных групп энергонесущих лучей. Более точная оценка уровня поля возможна с учетом анализа времени распространения сигнала [9] для каждой группы лучей, характерных для данного волновода.

Заключение

Предложенный метод позволяет произвести расчет суммарных потерь на распространение звука для узлов сетки, расположенных в пространственной области, представляющей интерес для решения таких задач как – определение поискового потенциала гидроакустических средств, работающих

в режиме РИП, а также обоснование оптимального размещения элементов системы обнаружения признаков полей объектов.

Алгоритмическая основа расчета параметров гидроакустического поля в двумерно-неоднородном канале распространения звука, с контролем критериев применимости лучевой теории, позволяет учесть изменчивость вертикального распределения скорости звука, рельеф дна вдоль трассы распространения сигналов, волнение поверхности моря, акустические свойства грунта [10, 11]. Применение процедуры кригинг-интерполяции позволяет отобразить результаты расчета суммарных потерь на распространение звука в трехмерном виде.

Литература

1. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
2. Петухов В.И. Проблемы создания информационно-аналитической системы мониторинга гидролого-акустической обстановки в океане. Информационные технологии. 1998. № 9. С. 31.
3. Петухов В.И., Малиновский В.Э., Василенко А.М. и др. Развитие информационно-аналитической системы прогноза гидролого-акустической обстановки на основе современных технологий: сб. тр. XIV сессии РАО, X школы-семинара Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2004. С. 431–435.
4. Петухов В.И. Методы автоматизированного районирования для геофизических приложений. Информационные технологии. 1998. №11. С. 32–35.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611591 Российская Федерация. Расчет эффективности применения гидроакустических средств и управление имитационной моделью гидроакустического эксперимента. Заявка № 2017662812: заявл. 05.12.2017: опубл. (зарег.) 02.02.2018. Бюл.

- № 2. / А.М. Василенко, В.А. Пятакович.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017664296 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования процесса распространения гидроакустических сигналов. Заявка № 2017661087: заявл. 31.10.2017.: опубл. (зарег.) 20.12.2017. / А.М. Василенко, В.А. Пятакович.; заявитель: В.А. Пятакович.
 7. Василенко А.М., Пятакович В.А. Аналитические свойства и функциональные возможности системы расчета пространственной структуры и параметров гидроакустического поля. Подводные исследования и робототехника. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2017. № 2 (24). С. 60–67.
 8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618492 Российская Федерация. Информационное обеспечение расчета пространственного расположения радиогидроакустических средств в северо-западной части Тихого океана. Заявка № 2018616271: заявл. 07.06.2018.: опубл. (зарег.) 13.07.2018 Бюл. № 7 / А.М. Василенко, В.А. Пятакович, М.В. Мироненко.
 9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
 10. Ломтев В. Л. О некоторых формах рельефа Тихоокеанской континентальной окраины Камчатки. Рельеф и структура осадочного чехла акваториальной части Дальнего Востока. Владивосток. 1981. С. 64–69.
 11. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 584 с.

References

1. Matvienko V.N., Tarasyuk Yu.F. Dal'nost' deystviya gidroakusticheskikh sredstv [Range of hydroacoustic means]. L.: Sudostroenie, 1981. 208 s.
2. Petukhov V.I. Problemy sozdaniya informatsionno-analiticheskoy sistemy monitoringa gidrologo-akusticheskoy obstanovki v okeane [Problems of creating an information-analytical system for monitoring the hydrological-acoustic situation in the ocean]. Informatsionnye tekhnologii. 1998. № 9. S. 31.
3. Petukhov V.I., Malinovskiy V.E., Vasilenko A.M. i dr. Razvitie informatsionno-analiticheskoy sistemy prognoza gidrologo-akusticheskoy obstanovki na osnove sovremennykh tekhnologiy [Development of an information and analytical system for forecasting hydrological and acoustic conditions based on modern technologies]: sb. tr. XIV sessii RAO, X shkoly-seminara L.M. Brekhovskikh. M.: GEOS, 2004. S. 431–435.
4. Petukhov V.I. Metody avtomatizirovannogo rayonirovaniya dlya geofizicheskikh prilozheniy [Automated zoning methods for geophysical applications]. Informatsionnye tekhnologii. 1998. №11. S. 32–35.
5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018611591 Rossiyskaya Federatsiya. Raschet effektivnosti primeneniya gidroakusticheskikh sredstv i upravlenie imitatsionnoy model'yu gidroakusticheskogo eksperimenta [Calculation of the effectiveness of the use of hydroacoustic means and control of a simulation model of a hydroacoustic experiment]. Zayavka № 2017662812: zayavl. 05.12.2017: opubl. (zareg.) 02.02.2018. Byul. № 2. / A.M. Vasilenko, V.A. Pyatakovich.
6. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2017664296 Rossiyskaya Federatsiya. Programma imitatsionnogo modelirovaniya protsessa rasprostraneniya gidroakusticheskikh signalov [Program for simulation of the process of propagation of hydroacoustic signals]. Zayavka № 2017661087: zayavl. 31.10.2017.: opubl. (zareg.) 20.12.2017. / A.M. Vasilenko, V.A. Pyatakovich.
7. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Analiticheskie svoystva i funktsional'nye vozmozhnosti sistemy rascheta prostranstvennoy struktury i parametrov gidroakusticheskogo polya [Analytical properties and functionality of the system for calculating the spatial structure and parameters of the hydroacoustic field]. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. Vladivostok : IPMT DVO RAN, 2017. № 2 (24). S. 60–67.
8. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018618492 Rossiyskaya Federatsiya. Informatsionnoe obespechenie rascheta prostranstvennogo raspolozheniya radiogidroakusticheskikh sredstv v severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana [Information support for calculating the spatial location of radiohydroacoustic facilities in the northwestern part of the Pacific Ocean]. Zayavka № 2018616271 : zayavl. 07.06.2018.: opubl. (zareg.) 13.07.2018 Byul. № 7 / A.M. Vasilenko, V.A. Pyatakovich, M.V. Mironenko.
9. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. SPb.: Piter, 2002. 608 s.
10. Lomtev V. L. O nekotorykh formakh rel'efa Tikhookeanskoy kontinental'noy okrainy Kamchatki. Rel'ef i struktura osadochnogo chekhla akvatorial'noy chasti Dal'nego Vostoka [On some forms of the relief of the Pacific continental margin of Kamchatka. The relief and structure of the sedimentary cover of the aquatorial part of the Far East]. Vladivostok. 1981. S. 64–69.
11. Kley K., Medvin G. Akusticheskaya okeanografiya [Acoustic oceanography]. M.: Mir, 1980. 584 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Пятакович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, Россия, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062. Russian Federation, e-mail: pva.877com@mail.ru

Анна Михайловна Василенко, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова 690062, Россия, г. Владивосток, Камский переулок, 6. e-mail: kahunya@gmail.com

Anna M. Vasilenko Ph.D. (Eng). Researcher at the research laboratory. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062. Russian Federation, e-mail: kahunya@gmail.com

Виктория Феликсовна Рычкова, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st., Vladivostok. 690059. Russian Federation, e-mail: rychkova@msun.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.02; 614.842.6; 629.331

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.054>

Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей.

А.А.Таранцев^{1,2} t__54@mail.ru, Д.А. Поташев² dim-po@igps.ru, Д.А. Скороходов¹ skorohodda@mail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, ²Санкт-Петербургский университет Государственный противопожарной службы МЧС России

Аннотация. В статье рассмотрена проблема обеспечения пожаровзрывобезопасности паромов, перевозящих газобаллонные автомобили и автомобили на комбинированном и водородном топливе. Показано, что взрывы таких автомобилей на паромах и последующие пожары могут привести к большому материальному ущербу, гибели и травмированию людей, риску затопления парома. С использованием компьютерного моделирования получена сложная ударно-волновая картина силового нагружения (импульсный характер воздействия, образование волн разрежения) конструкции парома и соседних автомобилей. Показано, что при взрыве и горении газа помимо ударной волны образуется облако раскалённых газов, излучение от которого приводит к ожогам кожи и провоцирует новые очаги пожаров. Даны рекомендации по снижению взрывопожароопасности паромов как за счёт конструктивных решений (оборудование закрытых палуб легкосбрасываемыми панелями и ленточными завесами, применение газоанализаторов и вытяжной вентиляции) и организационных мероприятий (предложено перевозить газобаллонные автомобили на открытых палубах), так и по действиям персонала, организующим и проводящим аварийно-спасательные работы.

Ключевые слова: Газобаллонные автомобили, паромы, пожаровзрывобезопасность, управление аварийно-спасательными работами

Для цитирования: Таранцев А.А., Поташев Д.А., Скороходов Д.А. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромах. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 279—283.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.054>

Fundamentals of management of fire and explosion safety of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles

Alexander A. Tarantsev^{1,2} t__54@mail.ru, Dmitriy A. Potashev² dim-po@igps.ru,
Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, ²St-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, St-Petersburg, Russia

Abstract. The article considers the problem of ensuring fire and explosion safety of ferries transporting gas-cylinder cars and cars on combined and hydrogen fuel. It is shown that explosions of such cars on ferries and subsequent fires can lead to great material damage, death and injury of people, the risk of flooding of the ferry. Using computer modeling, a complex shock-wave pattern of force loading (pulse nature of the impact, formation of rarefaction waves) of the ferry structure and neighboring cars was obtained. It is shown that during the explosion and ignition gas in addition to the shock wave, a cloud of incandescent gases is formed, the radiation from which leads to skin burns and provokes new fires. Recommendations are given to reduce the explosion and fire hazard of ferries both due to design solutions (equipment of closed decks with easily removable panels and tape curtains, the use of gas analyzers and exhaust ventilation) and organizational measures (it is proposed to transport gas-cylinder cars on open decks), and according to the actions of personnel.

Key words. Gas cylinder cars, ferries, fire and explosion safety, emergency management

For citation: Alexander A. Tarantsev, Dmitriy A. Potashev, Dmitriy A. Skorokhodov. Fundamentals of management of fire and explosion safety of ferry road transport in the presence of gas-cylinder vehicles 2022. № 4 part 1, P. 279—283.

Введение

Актуальность данной статьи обусловлена двумя современными тенденциями: появлением с одной стороны всё большего числа автомобилей на газообразном топливе, в частности, газобаллонных автомобилей (ГБА) [1], а с другой – значительными масштабами паромных перевозок автомобилей [2] как на открытых (рис.1-а), так и на закрытых палубах (рис.1-б).



а



б

Рис. 1. Паромы для перевозки автомобилей: с открытой палубой (а), океанский многопалубный (б), показанный условно в разрезе. Здесь и далее фото из открытых источников в интернете

Пожары автомобилей на таких пароме, как свидетельствует статистика [2], могут привести к трагическим последствиям. Интересно отметить, что как только вышла статья [2], где упоминался океанский автомобильный паром Felicity Ace, так на нём случился пожар [3] (рис.2) в феврале 2022 г. Пожар, продолжаясь несколько суток, уничтожил до 4 тыс. люксовых автомобилей (Audi, Porsche, Lamborghini и др.) на более, чем \$400 млн. и привёл к затоплению самого парома 1 марта во время шторма. Экипаж 22 человека, к счастью, был спасён.



Рис.2. Пожар на автомобильном пароме

Проблема взрывопожароопасности паромов

Очевидно, вышеупомянутый пожар мог привести и к более трагическим последствиям, перевозки паром ГБА и пассажиров, поскольку, как показано в [4, 5], взрывы газов в закрытых объёмах приводит к опасным ударно-волновым процессам и значительным разрушениям ограждающих конструкций и метательному эффекту - отбрасыванию соседних автомобилей, предметов и людей. Следует отметить, что взрыв ГБА на открытой палубе (рис.1-а) также опасен, но в меньшей степени – энергия ударной волны может рассеяться при выходе в открытое пространство.

Основными причинами взрыва ГБА могут являться [4] механические повреждения (например, соударение соседних автомобилей или удар о перегородку при сильной качке), запуск двигателя при утечке газа, а также возгорание соседнего автомобиля. При этом взрывы ГБА могут быть как чисто механическими (рис.3-а), так и с воспламенением газа (рис.3-б) и образованием «огненного шара», что намного опаснее - при взрыве

и возгорании C_3H_8 (пропана) массой 8 кг тепловой импульс достигает порядка $0,1 \text{ МВт/м}^2$ на расстоянии 10 м, приводящий к ожогу II степени.



а



б

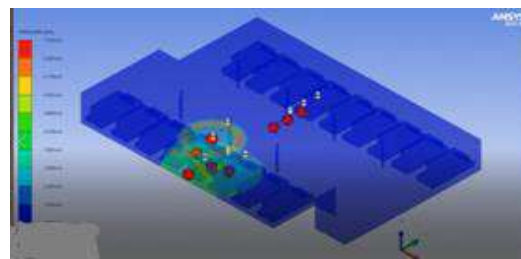
Рис.3. Взрывы (а) и пожары (б) ГБА

Хотя инциденты с ГБА на рис.3 произошли на открытом пространстве, нетрудно представить, какими последствиями это могло бы грозить на закрытой палубе парома.

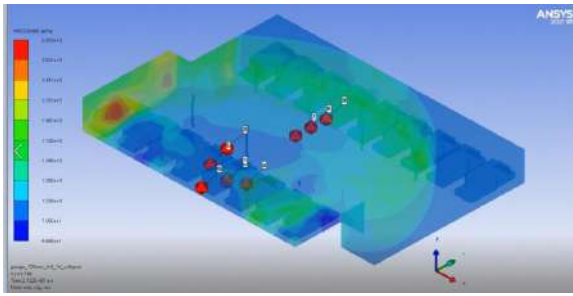
Следует отметить, что в действующих нормативных документах [6, 7] и др. проблеме взрывопожарной безопасности паромных перевозок ГБА не уделено достаточного внимания. В этой связи представляется целесообразным провести моделирование нагрузок, возникающих при взрыве ГБА на закрытой палубе (наиболее опасный случай), предложить, рассмотреть особенности действий экипажа и пассажиров при таком инциденте и дать предложения по конструктивным решениям по снижению разрушающих нагрузок на конструкции парома.

Особенности моделирования взрывов ГБА на закрытых палубах

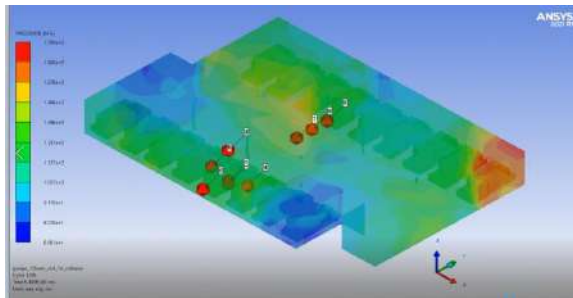
Для описания динамики ударной волны в замкнутом объёме (закрытой палубе парома) была использована компьютерная программа ANSYS Autodyn [8, 9], Полученная динамика ударной волны приведена на рис.4 и 5.



а



б

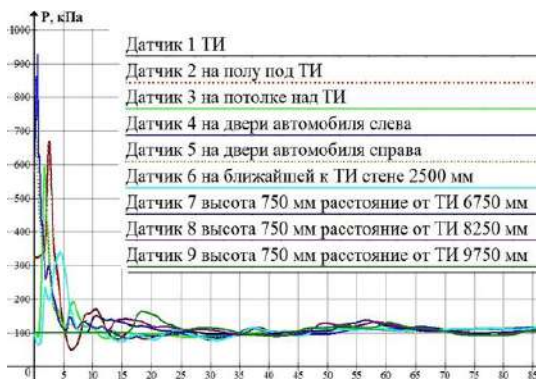


в

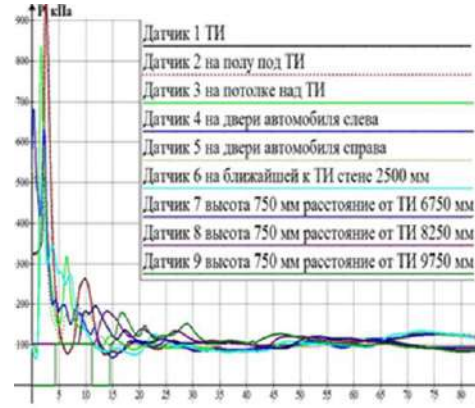
Рис.4. Визуализация динамики ударно-волновой картины при взрыве ГБА (красные точки – виртуальные датчики давления)

Как видно из рис.5, при взрыве ГБА будет иметь место импульсное и знакопеременное нагружение плоскостей палуб и переборок парома с последующей высокой вероятностью их механического разрушения. Ударной нагрузке от взрывной волны подвергнутся и соседние автомобили, что может спровоцировать серию взрывов, если это ГБА.

Точные значения ударных нагрузок при взрыве ГБА можно получить при задании конкретных размеров палуб парома. Кроме того, ударной волной от взрыва ГБА могут в случае взрыва быть разрушены трубопроводы корабельной системы пожаротушения, что осложнит действия пожарных расчётов.



а



б

Рис.5. Динамика избыточного давления в ударной волне при взрыве точечного источника (ТИ) в виде газового баллона в замкнутом объёме (а – ТИ в центре, б – ТИ у переборки). По горизонтальной оси время в миллисекундах

Если же недалеко от ГБА размещены электромобили [10], взрыв ГБА может спровоцировать повреждение аккумуляторных батарей с последующим горением электромобиля. Следует иметь ввиду, что горение электромобиля, как правило, носит взрывной характер (рис.6), что не позволяет моделировать динамику опасных факторов пожара (ОФП) с использованием полевой модели и реализующей её компьютерной программы PyroSim [11].



Рис.6. Взрывное горение электромобиля

Особенности тушения пожара и проведения аварийно-спасательных работ на пароме

С учётом вышеприведённых материалов управление взрывопожаробезопасности паромов при перевозке ГБА может с учётом [2, 4] осуществляться по трём направлениям: конструктивному, организационному и тактическому.

В части конструктивных мероприятий может быть предложено оборудовать закрытые палубы:

- прозрачными ленточными завесами (рис.7), разделяющими палубу на секции, поглощающими часть энергии ударной волны при взрыве и не препятствующими проезду автомобилей;

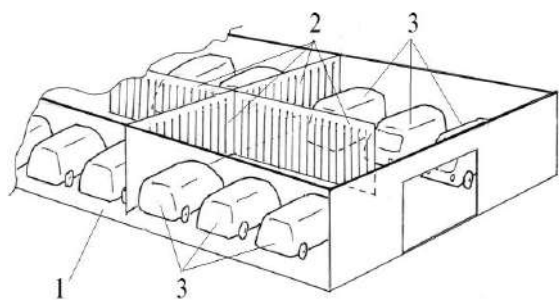


Рис.7. Взрывозащищённая закрытая палуба (1) с прозрачными ленточными завесами (2) для хранения автомобилей (3) в т.ч. ГБА (ЛСП не показаны)

- легкосбрасываемыми панелями (ЛСП) для выпуска энергии ударной волны наружу;
- пожарными извещателями, датчиками загазованности и системой видеонаблюдения с выводом информации на пост безопасности парома;
- системами аварийной и противодымной вентиляции, а также автоматического пожаротушения.

В части организационных мероприятий могут быть предложены следующие:

- ограничивать количество ГБА, автомобилей на комбинированном и водородном топливе, а также электромобилей, перевозимых паромом;
- размещать ГБА прежде всего на открытых палубах (рис.1-а) или на верхних закрытых палубах (при отсутствии открытых палуб) вдали от кают пассажиров;
- не допускать присутствия пассажиров на автомобильных палубах за исключением случаев расстановки автомобилей при загрузке парома и выезда автомобилей при разгрузке.

В части тактических действий могут быть предложены следующие:

- разработка порядка тушения пожара и проведения аварийно-спасательных работ (АСР) по

аналогии с [12] и проведение тренировок и учений в соответствии с ним;

- в случае взрыва ГБА: подать соответствующий сигнал береговым спасательным службам; организовать спасение людей и медицинскую помощь пострадавшим; приступить к проведению АСР в соответствии с создавшейся ситуацией; при необходимости организовать борьбу за живучесть парома;

- в случае пожара автомобиля: также подать соответствующий сигнал береговым спасательным службам; организовать спасение людей и медицинскую помощь пострадавшим; создать боевые участки по тушению пожара с учётом недопущения скопления воды на верхних палубах.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы управления взрывопожаробезопасностью паромов для перевозки автомобилей, в т.ч. ГБА, в части конструкционных, организационных и тактических мероприятий. Сформулированы соответствующие рекомендации.

На основании результатов компьютерного моделирования ударно-волновых процессов при взрыве ГБА на закрытой палубе показана опасность повреждения как ограждающих конструкций и корпуса парома, так и соседних автомобилей с последующим риском вторичных взрывов и пожара, а также высокий риск угрозы жизни и здоровью пассажиров и персонала парома.

В дальнейшем планируется: а) сформулировать предложения по обеспечению взрывопожарной безопасности паромов для внесения этих предложений в документы [6, 7]; б) провести моделирование пожара электромобиля на закрытой палубе парома; в) провести моделирование ОФП на плавучих (пришвартованных) автостоянках как аналогах подземных автостоянок и паромов.

Литература

1. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Сытдыков М.Р. О пожароопасности некоторых типов автомобилей // Электронный журнал «Вестник СПбУ ГПС МЧС России», №1, 2021, с.1-8. DOI: 10.24412/2218-130X-2021—1-1-8.
2. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Куватов В.И. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромах // Морские интеллектуальные технологии, №1, т.1, 2022, с.12-17.
3. <https://news.mail.ru/incident/50149896/>
4. Поташев Д.А. О проблеме взрывопожароопасности подземных автостоянок // Проблемы управления рисками в техносфере. №4 (60), 2021, с.132-139.
5. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. – 432 с.
6. Правила пожарной безопасности на морских судах. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10.
7. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. СОЛАС 74. Протокол 1988 г. (с изменениями).
8. Учебное пособие по теории. Autodyn Explicit software for nonlinear dynamics/ Theory manual /ANSYS. InCrevision – 4.3 – 2021.
9. <https://www.ansys.com/en-gb/academic/students/ansys-student>
10. Электромобили и автомобили с комбинированной энерго-установкой. Расчет скоростных характеристик: учеб. пособие /В.Е. Ютт, В.И. Строганов. – М.: МАДИ, 2016 – 108 с.
11. Карькин И.Н. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim // Екатеринбург. 2016. - 27 с.
12. Приказ МЧС России от 16.10.2017 г. № 444 "Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ"

References

1. Tarantsev A.A., Potashev D.A., Sytdykov M.R. On the fire hazard of some types of cars//Electronic journal "Bulletin of St. Petersburg State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia," No. 1, 2021, p. 1-8. DOI: 10.24412/2218-130Kh-2021 - 1-1-8.
2. 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, t.1, 2022, p.12-17.
3. <https://news.mail.ru/incident/50149896/>
4. Potashev D.A. On the problem of explosion and fire hazard of underground parking lots//Problems of risk management in the technosphere. No. 4 (60), 2021, pp. 132-139.
5. Beschastnov M.V. Industrial explosions. Evaluation and warning. M.: Chemistry, 1991. - 432 s.
6. Fire Safety Regulations on Marine Vessels. Resolution of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 31.10.2003 No. 10.
7. International Convention for the Safety of Life at Sea 1974 SOLAS 74. 1988 Protocol (as amended).
8. Theory tutorial. Autodyn Explicit software for nonlinear dynamics/ Theory manual /ANSYS. InCrevision – 4.3 – 2021.
9. <https://www.ansys.com/en-gb/academic/students/ansys-student>
10. Electric cars and cars with a combined power plant. Calculation of speed characteristics: training manual/V.E. Yutt, V.I. Stroganov. - M.: MADI, 2016 - 108 p.
11. Quarkin I.N. Library of reactions and combustion surfaces in PyroSim/Yekaterinburg. 2016. - 27 s.
12. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia of 16.10.2017 No. 444 "On approval of the Combat Charter of Fire Protection Units, which determines the procedure for organizing fire extinguishing and emergency rescue operations"

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: t__54@mail.ru

Дмитрий Анатольевич Поташев, старший преподаватель-методист, Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: dim-po@igps.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.ru

Alexander A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, 149, Moskovskiy prospect Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t__54@mail.ru

Dmitry A. Potashev, Senior Teacher-Methodist, St. Petersburg University of State Fire Services of Emercom of Russia, 149, Moskovskiy prospect, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: dim-po@igps.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, ¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences; 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 004.056.55

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.055>

Обобщенная методология построения аппаратно-ориентированных алгоритмов для цифровой обработки сигналов и изображений с использованием гиперкомплексных чисел различной размерности

Е.И. Духнич¹ evgenydukhnich@gmail.com¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье проводится систематизированный анализ таких аппаратно-ориентированных вычислительных алгоритмов, как CORDIC-подобные алгоритмы для быстрого решения задач линейной алгебры в ЦОС и других областях прикладных наук. При этом единым подходом является методология факторизации комплексных и гиперкомплексных чисел и их матричных представлений при реализации линейных преобразований с размерностью пространства $m = 2, 3, 4, 8$. Эти итерационные алгоритмы называются дискретными линейными преобразованиями. Они включают факторизацию комплексных или гиперкомплексных чисел с фиксированными коэффициентами простого вида и определение необходимых операторов факторизации на каждой итерации. Такой подход позволяет существенно сокращать сложность алгоритмов и значительно экономит время и физические ресурсы при аппаратной реализации дискретных линейных преобразований. Анализ включает в себя известные CORDIC-подобные алгоритмы и ранее предложенные автором. Приведен пример, иллюстрирующий методологию. Статья может помочь исследователям составить общее представление о путях решения обозначенной проблемы.

Ключевые слова: линейная алгебра, гиперкомплексные числа, факторизация, аппаратно-ориентированные алгоритмы, дискретные линейные преобразования, алгоритмы CORDIC, цифровая обработка сигналов

Для цитирования: Духнич Е.И. Обобщенная методология построения аппаратно-ориентированных алгоритмов для цифровой обработки сигналов и изображений с использованием гиперкомплексных чисел различной размерности, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 284—288.

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.055>

Generalized methodology for constructing hardware-oriented algorithms for digital signal and image processing using hypercomplex numbers of various dimensions

Evgeny I. Dukhnych¹ evgenydukhnich@gmail.com¹Admiral Ushakov Marine State University, Russian Federation

Abstract. The article provides a systematic analysis of such hardware-oriented computational algorithms as CORDIC-like algorithms for fast solutions of linear algebra problems in DSP and other areas of applied sciences. In this case, a single approach is the methodology of factorization of complex and hypercomplex numbers and their matrix representations in the implementation of linear transformations with space dimensions $m = 2, 3, 4, 8$. These iterative algorithms are called discrete linear transformations. They include factorization of complex or hypercomplex numbers with fixed coefficients of a simple form and determination of the necessary factorization operators at each iteration. This approach allows to significantly reduce the complexity of algorithms and significantly saves time and physical resources in the hardware implementation of discrete linear transformations. The analysis includes known CORDIC-like algorithms and those previously proposed by the author. An example illustrating the methodology is given. The article can help researchers to get a general idea of how to solve the identified problem.

Keywords: linear algebra, hypercomplex numbers, factorization, hardware-oriented algorithms, discrete linear transformations, CORDIC-like algorithms, digital signal processing

For citation: Evgeny I. Dukhnych, Generalized methodology for constructing hardware-oriented algorithms for digital signal and image processing using hypercomplex numbers of various dimensions. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 284—288.

Введение

Математический аппарат гиперкомплексных чисел (ГЧ) [1] успешно используется в навигации, управлении движением тела, небесной механике, механике космических полетов, релятивистской механике, теории поля, приборостроении, робототехнике, компьютерной графике, нейронных сетях.

Анализ математического содержания ЦОС и обработки изображений показывает, что их основными составляющими являются задачи линейной алгебры, в которых линейное преобразование вектора $X_{m \times 1}$ с матрицей P_m можно записать следующим образом:

$$Y_{m \times 1} = P_m X_{m \times 1}. \quad (1)$$

Для задания преобразований (1) P_m представляет собой матричную форму комплексного или

гиперкомплексного числа в зависимости от размерности m пространства [2]:

для $m=2$ – комплексные числа:
 $a = (a_0 + e_1 a_1),$ (2)

где $a_0, a_1 \in R; e_1$ - мнимая единица;

для $m=3$ или $m=4$ – кватернионы:
 $a = (a_0 + e_1 a_1 + e_2 a_2 + e_3 a_3),$ (3)

где $\{a_i\} (i = 0, 1, 2, 3) \in R; \{e_i\} (i = 1, 2, 3)$ – мнимые единицы;

для $m=8$ – октонионы:
 $a = (a_0 + e_1 a_1 + e_2 a_2 + e_3 a_3 + e_4 a_4 + e_5 a_5 + e_6 a_6 + e_7 a_7),$ (4)

где $\{a_i\} (i = 0, 1, \dots, 7) \in R; \{e_i\} (i = 1, \dots, 7)$ – мнимые единицы.

В основе построения обширного набора вычислительных алгоритмов лежит метод факторизации. Отдельную группу таких алгоритмов составляют аппаратно-ориентированные алгоритмы, которые строятся с использованием факторизации ГЧ или эквивалентных им матриц, целью которой является их декомпозиция в произведение сомножителей с элементами простого типа, что упрощает операции с ними. Реализация таких вычислительных методов с использованием микропроцессоров, специализированных интегральных схем (ASIC), программируемых вентильных матриц (FPGA) или другого аппаратного обеспечения позволяет значительно сэкономить время и физические ресурсы, что особенно важно в связи с появлением реконфигурируемых процессоров.

Вычисления (1) имеют сложность $O(m^2)$ умножений без учета сложности вычисления элементов матрицы преобразования. Главная идея снижения сложности вычислений (1) заключается в факторизации комплексного (гиперкомплексного числа):

$$a = \prod_{l=0}^{n-1} a^{(l)} \quad (5)$$

или в матричной форме:

$$P_m = \prod_{l=0}^{n-1} P_m^{(l)}, \quad (6)$$

в которой матрицы – сомножители имеют простые элементы в виде единиц или целых степеней основания системы счисления. Значение n определяет точность вычислений. Тогда вычисления (1) реализуются как итерационный процесс (дискретное линейное преобразование (ДЛП)):

$$Y_{m \times 1}^{(l+1)} = P_m^{(l)} Y_{m \times 1}^{(l)} \quad (l = 0, \dots, n-1), \quad (7)$$

где $Y_{m \times 1}^{(0)} = X_{m \times 1}, Y_{m \times 1}^{(n)} \rightarrow Y_{m \times 1}$, если $n \rightarrow \infty$.

Вычисления (7) выполняются за n итераций со сложностью $O(m^2)$ каждая, но в терминах “сложения и сдвига” [2], если матрица $P_m^{(l)}$ имеет простой вид (как это будет показано ниже). Здесь надо отметить, что вместо предварительного вычисления элементов матрицы P_m , достаточно только определять операторы факторизации как знаки некоторых операндов. Таким образом, сложность вычислений (1) существенно снижается.

Ниже проводится анализ алгоритмов ДЛП с ГЧ различной размерности для определения унифицированной процедуры их синтеза.

1. Комплексные числа ($m=2$)

Классическим примером аппаратно-ориентированного алгоритма является CORDIC-алгоритм [3], который выполняет линейное преобразование двумерного вектора $X_{2 \times 1}$ с матрицей P_2 на плоскости. Алгоритм представляет (факторизует) комплексное число - матрицу вращения P_2 в выражении (1) на угол:

$$\alpha = \alpha = \sum_{l=0}^{n-1} (\xi^{(l)} \Delta \varphi^{(l)}), \quad (8)$$

где оператор факторизации $\xi^{(l)} = \pm 1$ задает направление поворота. При этом матрица P_2 преобразуется в произведение матриц элементарных вращений на углы $\Delta \varphi^{(l)} = \arctg 2^{-l}$:

$$\begin{aligned} P_2 &= \prod_{l=0}^{n-1} P_2^{(l)} = \prod_{l=0}^{n-1} \begin{pmatrix} \cos \Delta \varphi^{(l)} & -\xi^{(l)} \sin \Delta \varphi^{(l)} \\ \xi^{(l)} \sin \Delta \varphi^{(l)} & \cos \Delta \varphi^{(l)} \end{pmatrix} \\ &= \prod_{l=0}^{n-1} \cos \Delta \varphi^{(l)} \begin{pmatrix} 1 & -\xi^{(l)} \operatorname{tg} \Delta \varphi^{(l)} \\ \xi^{(l)} \operatorname{tg} \Delta \varphi^{(l)} & 1 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{s} \prod_{l=0}^{n-1} R_2^{(l)}, \end{aligned}$$

где s – коэффициент масштабирования вектора:

$$s = \prod_{l=0}^{n-1} 1/\cos \Delta \varphi^{(l)} = \prod_{l=0}^{n-1} (1 + 2^{-2l})^{1/2} \quad (9)$$

и $R_2^{(l)}$ – матрица элементарного вращения (псевдо-вращения [3], так как $s \neq 1$) на l -ой итерации с элементами простого типа:

$$R_2^{(l)} = \begin{pmatrix} 1 & -\xi^{(l)} 2^{-l} \\ \xi^{(l)} 2^{-l} & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Таким образом, вместо (7), выполняются следующие вычисления:

$$Y_{2 \times 1}^{(l+1)} = R_2^{(l)} Y_{2 \times 1}^{(l)} \quad (l = 0, \dots, n-1), \quad (11)$$

где $Y_{2 \times 1}^{(0)} = X_{2 \times 1}$, если $n \rightarrow \infty$, то $Y_{2 \times 1}^{(n)} \rightarrow s P_2 X_{2 \times 1}$.

Вычисления (8-10) могут быть описаны в псевдокоде:

Инициализация: $Y_{2 \times 1}^{(0)} = X_{2 \times 1}; \varphi^{(0)} = \alpha \in \{-\pi/2, \pi/2\}$ (вращения) или $\varphi^{(0)} = 0$ (векторный режим).

Итерации: For $l = 0, \dots, n-1$:

$\xi^{(l)} = \operatorname{sign} \varphi^{(l)}$ (вращение) или $\xi^{(l)} = \operatorname{sign} y_2^{(l)}$ (векторный режим),

$$\begin{aligned} Y_{2 \times 1}^{(l+1)} &= R_2^{(l)} Y_{2 \times 1}^{(l)} \\ \varphi^{(l+1)} &= \varphi^{(l)} - \xi^{(l)} \Delta \varphi^{(l)} \end{aligned}$$

Компенсация масштабирования: $Y_{2 \times 1} = (1/s) Y_{2 \times 1}^{(n)}$. Меняя способ определения значения оператора факторизации $\xi_i = \pm 1$, можно получить различные модификации ДЛП [4-6].

2. Кватернионы

2.1. 3-D CORDIC algorithms ($m=3$)

Поворот на пространственный угол φ может быть описан с помощью унитарного кватерниона в полярной форме [2]:

$$U = \cos \varphi + (i\alpha + j\beta + k\gamma) \sin \varphi \quad (12)$$

Тогда вращение кватерниона $v = (0 + ix_1 + jx_2 + kx_3)$ можно описать двусторонним преобразованием:

$$v_{rot} = uvu^{-1}. \quad (13)$$

Фактически происходит вращение 3-D вектора вокруг оси $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ на угол 2φ в пространстве. Принимая во внимание равенство трех компонент кватерниона v и вектора $X_{3 \times 1}$, можно заключить, что преобразования (1) для $m=3$ и (13) эквивалентны. Поэтому можно применить к выражению (13) факторизацию и заменить его на последовательность элементарных вращений на углы $\Delta\varphi^{(l)}$:

$$v^{(n)} = \left(\prod_{l=0}^{n-1} u^{(l)}\right)v^{(0)}\left(\prod_{l=0}^{n-1} (u^{(l)})^{-1}\right) \quad (14)$$

Преобразование (14) выполняется как итерационный процесс:

$$v^{(l+1)} = u^{(l)}v^{(l)}(u^{(l)})^{-1}, \quad (l = 0, \dots, n-1; v^{(0)} = 0 + ix_1 + jx_2 + kx_3). \quad (15)$$

Результат (15) совпадет с (13), если:

$$\varphi = \sum_{l=0}^{n-1} (\xi^{(l)} 2\Delta\varphi^{(l)}),$$

где $\xi^{(l)} = \pm 1$ – оператор направления поворота на угол $\Delta\varphi^{(l)} = \arctg 2^{-l}$.

Тогда элементарный кватернион в (14) можно записать:

$$u^{(l)} = \cos\Delta\varphi^{(l)} + \xi^{(l)}(i\alpha_l + j\beta_l + k\gamma_l)\sin\Delta\varphi^{(l)} = \cos\Delta\varphi^{(l)}(1 + \xi^{(l)}(i\alpha_l + j\beta_l + k\gamma_l))2^{-l} = \cos\Delta\varphi^{(l)}q^{(l)}, \quad (16)$$

$$\text{где } q^{(l)} = 1 + \xi_l(i\alpha_l + j\beta_l + k\gamma_l)2^{-l}, \quad (17)$$

Вращение (13) можно представить односторонним преобразованием с 3×3 матрицей [2]:

$$R_3^{(l)} = \begin{bmatrix} w^2 + x^2 - y^2 - z^2 & 2xy - 2wz & xz + wy \\ 2xy + 2wz & w^2 - x^2 + y^2 - z^2 & 2yz - 2wx \\ xz - wy & 2yz + 2wx & w^2 - x^2 - y^2 + z^2 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где из (17) $w = 1, x = \xi^{(l)} \alpha^{(l)} 2^{-l}, y = \xi^{(l)} \beta^{(l)} 2^{-l},$

$$z = \xi^{(l)} \gamma^{(l)} 2^{-l}.$$

2.2. Пример для иллюстрации методологии.

Для синтеза алгоритма в заданном режиме необходимо на каждой итерации изменять параметры оси вращения (величину и/или знак) и направления поворота в зависимости от знаков координат вектора $Y_{3 \times 1}^{(l)}$. Например, для определения модуля вектора (векторный режим) можно генерировать эти параметры таким образом, чтобы вектор $Y_{3 \times 1}^{(l)}$ приближался к горизонтальной оси координат. Примем, например, параметр $(\xi^{(l)} = +1)$. Тогда операторы факторизации можно определить из Таблицы 1.

Таким образом, параметры для (17) примут вид:

$$\begin{aligned} \text{sign } \beta^{(l)} &= \text{sign } y_3^{(l)}, \text{ sign } \gamma^{(l)} = \\ &= -\text{sign } y_2^{(l)}; \xi^{(l)} = 1; \alpha^{(l)} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), получим:

$$R_3^{(l)} = \begin{bmatrix} 1 - 2^{-2l+1} & -\gamma^{(l)}2^{-l+1} & \beta^{(l)}2^{-l+1} \\ \gamma^{(l)}2^{-l+1} & 1 & \beta^{(l)}\gamma^{(l)}2^{-2l+1} \\ -\beta^{(l)}2^{-l+1} & \beta^{(l)}\gamma^{(l)}2^{-2l+1} & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Таблица 1

Зависимость параметров от октанта.

Знаки компонент вектора $Y_{3 \times 1}^{(l)}$				Знаки параметров оси вращения			
Октант	$y_1^{(l)}$	$y_2^{(l)}$	$y_3^{(l)}$	Октант	$\alpha^{(l)}$	$\beta^{(l)}$	$\gamma^{(l)}$
1	+	+	+	5-6	0	+	-
2	-	+	+	5-6	0	+	-
3	-	-	+	1-2	0	+	+
4	+	-	+	1-2	0	+	+
5	+	+	-	7-8	0	-	-
6	-	+	-	7-8	0	-	-
7	-	-	-	3-4	0	-	+
8	+	-	-	3-4	0	-	+

Алгоритм ДЛП примет вид:

$$Y_{3 \times 1}^{(l+1)} = R_3^{(l)} Y_{3 \times 1}^{(l)} \quad (l = 0, \dots, n-1; Y_{3 \times 1}^{(0)} = X_{3 \times 1}),$$

а его результат:

$$y_1^{(n)} = s\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}; y_2^{(l)} = y_3^{(l)} = 0; s = \prod_{l=0}^{n-1} (1 + 2^{-2l+1}).$$

3.3. Кватернионный CORDIC - алгоритм ($m=4$)

В матричной форме кватернион (12) имеет вид:

$$P_4 = \begin{bmatrix} \cos\varphi & a\sin\varphi & \beta\sin\varphi & \gamma\sin\varphi \\ -a\sin\varphi & \cos\varphi & -\gamma\sin\varphi & \beta\sin\varphi \\ -\beta\sin\varphi & \gamma\sin\varphi & \cos\varphi & -a\sin\varphi \\ -\gamma\sin\varphi & -\beta\sin\varphi & a\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (20)$$

После факторизации и представления угла как в (8), можно записать:

$$P_4 = \left(\prod_{i=0}^n \cos\Delta\varphi_i R_{4,i}\right).$$

При этом матрица элементарного вращения на угол $\Delta\varphi^{(l)} = \arctg 2^{-l}$ принимает вид:

$$R_4^{(l)} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^{(l)} 2^{-l} & \beta^{(l)} 2^{-l} & \gamma^{(l)} 2^{-l} \\ -\alpha^{(l)} 2^{-l} & 1 & -\gamma^{(l)} 2^{-l} & \beta^{(l)} 2^{-l} \\ -\beta^{(l)} 2^{-l} & \gamma^{(l)} 2^{-l} & 1 & -\alpha^{(l)} 2^{-l} \\ -\gamma^{(l)} 2^{-l} & -\beta^{(l)} 2^{-l} & \alpha^{(l)} 2^{-l} & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где операторы факторизации $\alpha^{(l)}, \beta^{(l)}, \gamma^{(l)}$ равны ± 1 . Вращение 4-D вектора $X_{4 \times 1}$ до совпадения с одной из координатных осей (векторный режим) обеспечивается следующими операторами [7]:

$$\begin{aligned} \alpha^{(l)} &= f^{(l)} \text{sign} (y_2^{(l)}); \beta^{(l)} = f^{(l)} \text{sign} (y_3^{(l)}); \\ \gamma_i &= f^{(l)} \text{sign} (y_4^{(l)}); f^{(l)} = \text{sign} (y_1^{(l)}). \end{aligned}$$

В результате получим вектор $sY_{4 \times 1} = \left(\prod_{l=1}^n R_4^{(l)}\right) X_{4 \times 1}$ с коэффициентом $s = \prod_{l=1}^n \sqrt{1 + 3(2^{-2l})}$.

3. Октонионы ($m=8$)

Если имеется вектор с двумя кватернионными элементами (например, два пикселя цветного изображения [8]), можно описать его 8-D вращение, используя октавы или октонионы [2]. Октонион (4) может быть представлен в матричной форме [9]:

$$\mathbf{P}_8 = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ -a_1 & a_0 & -a_4 & -a_7 & a_2 & -a_6 & a_5 & a_3 \\ -a_2 & a_4 & a_0 & -a_5 & a_1 & a_3 & -a_7 & a_6 \\ -a_3 & a_7 & a_5 & a_0 & -a_6 & -a_2 & a_4 & -a_1 \\ -a_4 & -a_2 & a_1 & a_6 & a_0 & -a_7 & -a_3 & a_5 \\ -a_5 & a_6 & -a_3 & a_2 & a_7 & a_0 & -a_1 & -a_4 \\ -a_6 & -a_5 & a_7 & -a_4 & a_3 & a_1 & a_0 & -a_2 \\ -a_7 & -a_3 & -a_6 & a_1 & -a_5 & a_4 & a_2 & a_0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

$$\mathbf{R}_8^{(l)} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^{(l)} t^{(l)} & \beta^{(l)} t^{(l)} & \gamma^{(l)} t^{(l)} & \delta^{(l)} t^{(l)} & \lambda^{(l)} t^{(l)} & \mu^{(l)} t^{(l)} & \rho^{(l)} t^{(l)} \\ -\alpha^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\delta^{(l)} t^{(l)} & -\rho^{(l)} t^{(l)} & \beta^{(l)} t^{(l)} & -\mu^{(l)} t^{(l)} & \lambda^{(l)} t^{(l)} & \gamma^{(l)} t^{(l)} \\ -\beta^{(l)} t^{(l)} & \delta^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\lambda^{(l)} t^{(l)} & -\alpha^{(l)} t^{(l)} & \gamma^{(l)} t^{(l)} & -\rho^{(l)} t^{(l)} & \mu^{(l)} t^{(l)} \\ -\gamma^{(l)} t^{(l)} & \rho^{(l)} t^{(l)} & \lambda^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\mu^{(l)} t^{(l)} & -\beta^{(l)} t^{(l)} & \delta^{(l)} t^{(l)} & -\alpha^{(l)} t^{(l)} \\ -\delta^{(l)} t^{(l)} & -\beta^{(l)} t^{(l)} & \alpha^{(l)} t^{(l)} & \mu^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\rho^{(l)} t^{(l)} & -\gamma^{(l)} t^{(l)} & \lambda^{(l)} t^{(l)} \\ -\lambda^{(l)} t^{(l)} & \mu^{(l)} t^{(l)} & -\gamma^{(l)} t^{(l)} & \beta^{(l)} t^{(l)} & \rho^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\alpha^{(l)} t^{(l)} & -\delta^{(l)} t^{(l)} \\ -\mu^{(l)} t^{(l)} & -\lambda^{(l)} t^{(l)} & \rho^{(l)} t^{(l)} & -\delta^{(l)} t^{(l)} & \gamma^{(l)} t^{(l)} & \alpha^{(l)} t^{(l)} & 1 & -\beta^{(l)} t^{(l)} \\ -\rho^{(l)} t^{(l)} & -\gamma^{(l)} t^{(l)} & -\mu^{(l)} t^{(l)} & \alpha^{(l)} t^{(l)} & -\lambda^{(l)} t^{(l)} & \delta^{(l)} t^{(l)} & \beta^{(l)} t^{(l)} & 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где параметр вращения $t^{(l)} = 2^{-f^{(l)}}$, $\{f^{(l)}\}$ – последовательность целых чисел, и операторы факторизации $-\alpha^{(l)}, \dots, \rho^{(l)}$ равны ± 1 .

Октонионный CORDIC-алгоритм имеет вид:

$$\mathbf{Y}_{8 \times 1}^{(l+1)} = \mathbf{R}_8^{(l)} \mathbf{Y}_{8 \times 1}^{(l)}, \quad (l = 0, \dots, n-1; \mathbf{Y}_{8 \times 1}^{(0)} = \mathbf{X}_{8 \times 1}). \quad (25)$$

Результат вычислений (25) равен $s\mathbf{Y}_{8 \times 1} = \mathbf{Y}_{8 \times 1}^{(n)} = \left(\prod_{l=0}^{n-1} \mathbf{R}_8^{(l)} \right) \mathbf{X}_{8 \times 1}$, где $s = \prod_{l=0}^{n-1} \left(\sqrt{1 + 7(t^{(l)})^2} \right)$. В векторном режиме, чтобы положить 8-D вектор $\mathbf{X}_{8 \times 1} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T$ на горизонтальную ось, необходимо определять параметры факторизации для (24) по выражениям [9]:

$$\begin{aligned} \alpha^{(l)} &= f^{(l)} \text{sign}(z_2^{(l)}); \beta^{(l)} = f^{(l)} \text{sign}(z_3^{(l)}); \\ \gamma^{(l)} &= f^{(l)} \text{sign}(z_4^{(l)}); \delta^{(l)} = f^{(l)} \text{sign}(z_5^{(l)}); \\ \lambda^{(l)} &= f^{(l)} \text{sign}(z_6^{(l)}); \mu^{(l)} = f^{(l)} \text{sign}(z_7^{(l)}); \\ \rho^{(l)} &= f^{(l)} \text{sign}(z_8^{(l)}); f^{(l)} = \text{sign}(z_1^{(l)}), \end{aligned} \quad (26)$$

где $z_j^{(l)} = y_j^{(l)}$ ($j = 1, 2, \dots, 8$) обозначают j -ую компоненту вектора $\mathbf{Z}_{8 \times 1}^{(l)} = \mathbf{Y}_{8 \times 1}^{(l)}$, на начало $(l+1)$ -ой итерации. В общем случае операнды для (26) могут быть взяты, как элементы другого вектора «налету».

В [9] для гарантии сходимости определена последовательность:

$$f^{(l)} = \{0, 1', 2', 3', 4', 5, 6, 7', 8, \dots, 13', 14, \dots, 31\},$$

где знак (') обозначает повторение итерации.

Таким образом, для точности 32-бит необходимо 38 итераций. Следует упомянуть эффективное использование этого ДЛП для декомпозиции кватернионных матриц [9, 10].

Если октонион имеет единичный модуль ($|a|=1$), его можно записать в «полярном» виде:

$$o = \cos \varphi + (i\alpha + j\beta + k\gamma + l\delta + q\lambda + r\mu + s\rho) \sin \varphi.$$

Проведя факторизацию, можно представить 8-D матрицу вращения [9] как:

$$\mathbf{P}_8 = \prod_{l=0}^{n-1} (\cos \Delta \varphi^{(l)} \mathbf{R}_8^{(l)}),$$

где матрица $\mathbf{R}_8^{(l)}$ имеет вид (24):

Заключение

В статье на основе анализа алгоритмов типа CORDIC определены общие шаги методологии их синтеза:

1. В зависимости от размерности линейного преобразования выбирается тип ГЧ для его представления.
2. Факторизация ГЧ и его эквивалентного матричного представления дает возможность организовать итерационный вычислительный процесс. В результате произведение преобразований ассоциируется с суммой их углов вращения (например, (8)). Число сомножителей определяет точность вычислений.
3. На каждой итерации l берется уменьшающееся значение угла $\Delta \varphi^{(l)} = \arctg 2^{-l}$, которое приводит к простой и фиксированной форме матриц-сомножителей (например, (10)). В зависимости от требуемого результата определяются операторы факторизации как знаковые функции некоторых операндов.
4. Все алгоритмы выполняют ДЛП как последовательность коротких операций сложения-сдвига, что существенно сокращает сложность алгоритмов, экономит время и физические ресурсы при аппаратной реализации.

Следует отметить, что кроме ДЛП предлагаемый подход (применение отдельных множителей при факторизации ГЧ) может быть использован для построения аппаратно-ориентированных алгоритмов в криптографии [11].

Литература

1. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа, М., изд. Наука, 1974, 224 с.
2. Ward J.P. Quaternions and Cayley Numbers, Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.
3. Meher P., Valls J., Juang, T.-B., Sridharan K., Maharatna K. 50 years of CORDIC: algorithms, architectures, and applications. IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, Volume 56, no. 9, pp. 893 – 1907.

4. Nguyen K.-D., Kiet D. T., Hoang T.-T., Quynh N., Pham C.-K. A CORDIC-based trigonometric hardware accelerator with custom instruction in 32-bit RISC-V system-on-chip. Proceedings of IEEE Hot Chips 33 Symposium (HCS), 2021.
5. Raut G., Rai S., Vishvakarma, S. K., Kumar, A. RECON: resource-efficient CORDIC-based neuron architecture, IEEE Open Journal of Circuits and Systems, 2021, Volume 1.
6. Wu J., Zhan Y., Peng, Yu Ji .G., Zhao R. Wang, C. Efficient design of spiking neural network with STDP learning based on fast CORDIC. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2021, Volume 68, issue 6, pp. 2522-2534.
7. Hsiao S.-F., Delosme J.-M. Parallel processing of complex data using quaternion and pseudo-quaternion CORDIC algorithms. Proceedings of the ASAP'94 Conf., University of California, 1994, pp.125-130.
8. Sangwine S. Fourier transforms of color images using quaternion or hypercomplex numbers. Electronic Lett., 1996, Volume 32(21), pp. 1979–1980.
9. Doukhnich E., Ozen E. Hardware-oriented algorithm for quaternion-valued matrix decomposition. IEEE Transactions on Circuits and Systems--II: Express Briefs, 2011, Volume 58, no. 4, pp.225-229.
10. Doukhnich E., Podbelskiy V. Higher parallel hardware-oriented algorithm for Jacobi SVD of the quaternion-valued matrix. Parallel and Cloud Computing Research, 2013, Volume 1, no.3, pp.41-49.
11. Doukhnich E., Chefranov A., Mahmoud A. Encryption schemes with hypercomplex number systems and their hardware-oriented implementation. In Theory and Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems, Publisher: IGI Global, USA, 2013, pp. 110-133.

References

1. Kantor I. L., Solodovnikov. A. S. Hypercomplex Numbers—An Elementary Introduction to Algebras, Springer-Verlag: New York, 1989.
2. Ward J.P. Quaternions and Cayley Numbers, Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.
3. Meher P., Valls J., Juang, T.-B., Sridharan K., Maharatna K. 50 years of CORDIC: algorithms, architectures, and applications. IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, Volume 56, no. 9, pp. 893 – 1907.
4. Nguyen K.-D., Kiet D. T., Hoang T.-T., Quynh N., Pham C.-K. A CORDIC-based trigonometric hardware accelerator with custom instruction in 32-bit RISC-V system-on-chip. Proceedings of IEEE Hot Chips 33 Symposium (HCS), 2021.
5. Raut G., Rai S., Vishvakarma, S. K., Kumar, A. RECON: resource-efficient CORDIC-based neuron architecture, IEEE Open Journal of Circuits and Systems, 2021, Volume 1.
6. Wu J., Zhan Y., Peng, Yu Ji .G., Zhao R. Wang, C. Efficient design of spiking neural network with STDP learning based on fast CORDIC. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2021, Volume 68, issue 6, pp. 2522-2534.
7. Hsiao S.-F., Delosme J.-M. Parallel processing of complex data using quaternion and pseudo-quaternion CORDIC algorithms. Proceedings of the ASAP'94 Conf., University of California, 1994, pp.125-130.
8. Sangwine S. Fourier transforms of color images using quaternion or hypercomplex numbers. Electronic Lett., 1996, Volume 32(21), pp. 1979–1980.
9. Doukhnich E., Ozen E. Hardware-oriented algorithm for quaternion-valued matrix decomposition. IEEE Transactions on Circuits and Systems--II: Express Briefs, 2011, Volume 58, no. 4, pp.225-229.
10. Doukhnich E., Podbelskiy V. Higher parallel hardware-oriented algorithm for Jacobi SVD of the quaternion-valued matrix. Parallel and Cloud Computing Research, 2013, Volume 1, no.3, pp.41-49.
11. Doukhnich E., Chefranov A., Mahmoud A. Encryption schemes with hypercomplex number systems and their hardware-oriented implementation. In Theory and Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems, Publisher: IGI Global, USA, 2013, pp. 110-133.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Евгений Иванович Духнич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный Морской Университет им адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Россия, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: evgenydukhnich@gmail.com

Evgeny I. Dukhnych, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of radioelectronics and information technologies, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin str, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: evgenydukhnich@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.02.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.07.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 25.09.2022.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.056>

Расчет изменения жесткости демпфера крутильных колебаний Geislinger D60/14/2 при износе пружин

М.Н. Покусаев¹ evt2006@rambler.ru, К.О. Сибряев¹ evt2006@rambler.ru,
М.М. Горбачев¹ max9999_9@mail.ru, А.Д. Ибадуллаев¹ adel.ibadullaev99@mail.ru

¹Астраханский государственный технический университет

Аннотация. Современные вопросы импортозамещения в судовых энергетических установках касаются не только изготовления собственных агрегатов и механизмов, но и разработки методик расчета их конструктивных и эксплуатационных параметров, что подтверждает актуальность темы исследования. В статье рассматривается методика расчета жесткости пружинных демпферов крутильных колебаний, обобщенная авторами на основе анализа научно-технической литературы и дополненная собственными исследованиями. В качестве практического применения методики в статье приводятся результаты расчета жесткости демпфера крутильных колебаний Geislinger D60/14/2, устанавливаемого на дизелях Wartsila 6L20 и Wartsila 9L20. Полученные в работе данные говорят о хорошей сходимости результатов расчетов по полученной методике (в пределах 2%) и возможности ее применения для практической оценки изменения жесткости демпферов крутильных колебаний при износе их пружин. Это позволяет использовать результаты работы для разработки методики безразборной оценки технического состояния пружинных демпферов судовых дизелей.

Ключевые слова: крутильные колебания, пружинный демпфер, судовой машинно-двигательный комплекс, судовая энергетическая установка, судовой дизель.

Для цитирования: Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Горбачев М.М., Ибадуллаев А.Д. Расчет изменения жесткости демпфера крутильных колебаний Geislinger D60/14/2 при износе пружин, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 289—294.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.056>

Calculation of the change in the stiffness of the Geislinger D60/14/2 torsional vibration damper during spring wear

Mikhail N. Pokusaev¹ evt2006@rambler.ru, Konstantin O. Sibrayev¹ evt2006@rambler.ru,
Maksim M. Gorbachev¹ max9999_9@mail.ru, Adel D. Ibadullaev¹ adel.ibadullaev99@mail.ru

¹Astrakhan state technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. Modern issues of import substitution in marine power plants concern not only the manufacture of their own units and mechanisms, but also the development of methods for calculating their design and operational parameters, which confirms the relevance of the research topic. The article discusses the method of calculating the stiffness of spring dampers of torsional vibrations, generalized by the authors based on the analysis of scientific and technical literature and supplemented by their own research. As a practical application of the technique, the article presents the results of calculating the stiffness of the Geislinger D60/14/2 torsional vibration damper installed on Wartsila 6L20 and Wartsila 9L20 diesels. The data obtained in the work indicate a good convergence of the calculation results according to the obtained method (within 2%) and the possibility of its application for practical evaluation of changes in the stiffness of torsional vibration dampers during wear of their springs. This makes it possible to use the results of the work to develop a methodology for a non-selective assessment of the technical condition of the spring dampers of marine diesel engines.

Keywords: torsional vibrations, spring damper, marine engine and propulsion system, ship power plant, marine diesel.

For citation: Mikhail N. Pokusaev, Konstantin O. Sibrayev, Maksim M. Gorbachev, Adel D. Ibadullaev, Calculation of the change in the stiffness of the Geislinger D60/14/2 torsional vibration damper during spring wear, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 289—294.

Введение

Процесс обновления транспортного флота приводит не только к появлению новых судов, но, и к применению новых схем судовых машинно-двигательных комплексов (МДК) [1, 2]. Если для судов устаревших типов «Волгонефть», «Нефтерудовоз», «Волго-Балт» и других были характерны МДК со среднеоборотными дизелями с прямой или редукторной передачей на гребной винт [3], то для судов новых проектов RST, RSD характерно использование дизелей с повышенной

частотой вращения с передачей мощности через упругие муфты на винто-рулевые колонки [4]. Подобные технические решения повышают маневренность судов, но, с другой стороны, приводят к развитию большого количества моторных и валопроводных форм крутильных колебаний, частота которых входит в рабочий диапазон частот вращения судового дизеля. Силиконовые демпферы, ранее применявшиеся для главных двигателей судов устаревших проектов не могут обеспечить эффективное снижение амплитуд крутильных колебаний на всех резонансных частотах, поэтому,

такие производители, как: MAK, CAT, Wartsila на своих современных дизелях устанавливают комбинированные демпферы с механической частью в виде рессорных или цилиндрических пружин и гидравлического наполнителя в виде масла, поступающего под давлением из системы смазки двигателя. В научно-технической литературе демпферы подобной конструкции называют по-разному, например, «упруго-фрикционные» [5], «нелинейные антивибраторы» [6], в Правилах РМРС [7] они имеют обозначение как «пружинные демпферы», а в документации зарубежных фирм производителей [8] их называют «spring» («пружинные демпферы»). Подобная конструкция позволяет эффективно снижать амплитуды крутильных колебаний в широком диапазоне частот. Если брать в качестве основного документа правила Российского морского регистра судоходства (РМРС) [7, 9], то в них нет понятия «комбинированный демпфер», поэтому, далее мы будем использовать термин «пружинный демпфер», подразумевая наличие в нем пружинных пакетов и гидравлического наполнителя. Эксплуатация дизелей и пружинных демпферов иностранного производства в условиях политических и экономических ограничений и санкций, приводит к необходимости изучения методов прогнозирования изменения эффективности демпферов в процессе их эксплуатации. Это требует анализа уже имеющихся исследований в данной области и их обобщения в виде отдельной методики, что позволит производить оценку роста крутильных колебаний при изменении параметров демпфера в процессе его эксплуатации. Это необходимо в дальнейшем для разработки методики безразборной оценки технического состояния пружинных демпферов.

Исследование и его результаты

При расчете параметров крутильных колебаний судовых МДК в ряде случаев отсутствуют данные по жесткости (податливости) демпферов, так как зачастую они содержатся в отдельных специальных формулярах, не всегда присутствующих в общем пакете технической документации на судах. В этом случае, перед инженерами стоит задача по расчетной оценке данного параметра при практических процедурах торсиографирования судовых МДК. Использование для решения поставленной задачи дифференциальных уравнений классической теории пружинного демпфера требует применение специальных математических методов или программного продукта типа «Mathcad», однако, для быстрой оценки жесткости при проведении полевых испытаний, расчета частоты резонансных колебаний или при подготовке предварительных результатов торсиографирования судового МДК, подобные методы трудоемки и не всегда доступны. Поэтому, для проведения теоретического расчета

жесткости пружинного демпфера возможно использование достаточно простой методики, предложенной в работе Ефремова Л.В. [5]. Проведем анализ методики и используем его для оценки жесткости демпферов модели Geislinger D60/14/2. Для расчета использовались официальные инструкции по эксплуатации и чертежи демпфера Geislinger D60/14/2, [8, 10].

Технические характеристики демпфера Geislinger D60/14/2:

- Тип демпфера Geislinger D60/14/2: демпфер крутильных колебаний, с пластинами рессорного типа (прямоугольные пластины переменной толщины), с гидравлическим наполнителем в виде масла от системы смазки двигателя;

- момент инерции внешней массы демпфера: 7,1 кг*м²;

- момент инерции внутренней массы демпфера: 0,373 кг*м²;

- масса внешней массы демпфера: 121 кг;

- масса внутренней массы демпфера: 18 кг;

- тепловая мощность: 7,5 кВт;

- крутильная жесткость: $1,4 \cdot 10^6$ Н*м/рад;

- допустимый эластичный крутящий момент: 14,6 кН*м;

- кратковременный предельный эластичный крутящий момент: 21,8 кН*м;

- расход масла через демпфер при вязкости 15 мм/с² и абс. давлении 4 бар: 5,4 л/мин.;

- материал пружинных рессорных пластин: сталь.

Общий вид конструкции демпфера Geislinger D60/14/2 представлен на рис. 1, а схема для определения исходных данных для расчета, полученная на основе анализа технической документации представлена на рис. 2.

Исходные данные для расчета:

1. Число пружинных пакетов, m : 24 шт.;

2. Число пружин в пружинных пакетах, n : 2 шт.;

3. Средняя толщина пластин, $h_{\text{ср}}$: 0,006 м;

4. Ширина пластин, b : 0,05 м;

5. Длина пластин, l : 0,12 м;

6. Расстояние от центра демпфера до крепления пластин во внутреннем кольце (звездочке), R : 0,155 м;

7. Модуль упругости материала пластин, $E_{\text{мат}}$ для пружинной стали, используемой для изготовления рессорных пружин, (например, 55ХГР по ГОСТ 14959-2016 для рессорной полосовой стали с толщиной 3 - 24 мм) составляет от $2,0 \cdot 10^{11}$ - до $2,059 \cdot 10^{11}$ МПа при температуре 20 °С.

Поскольку в исходной формуле Ефремова Л.В. указывается толщина пластины h без ее изменения по длине пружины, то, с учетом особенности конструкции Geislinger D60/14/2, на наш взгляд следует использовать $h_{\text{ср}}$ – толщину средней части пластины (рис. 2).

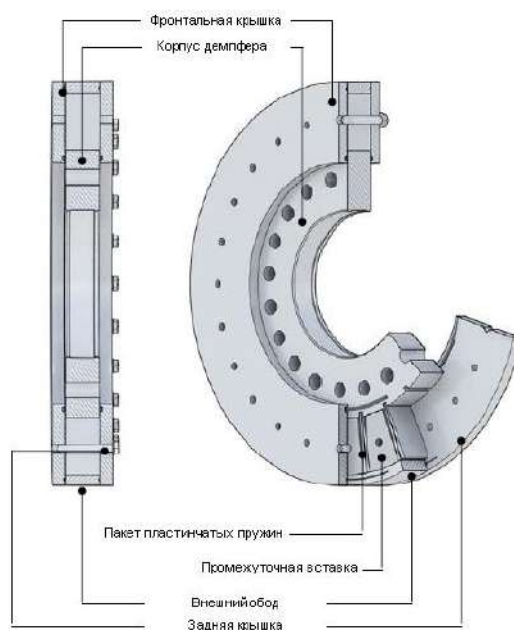


Рис. 1. Общий вид конструкции демпфера Geislinger D60/14/2

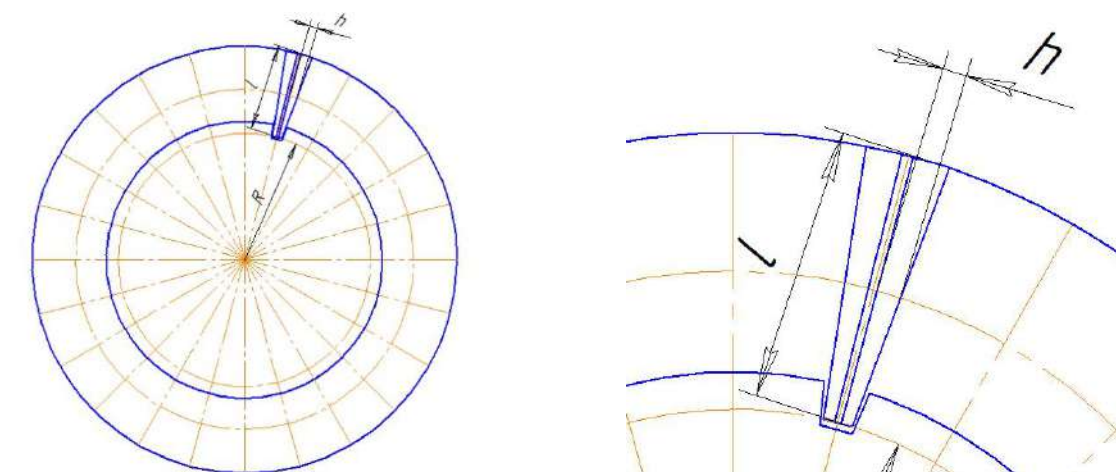


Рис. 2. Схема для определения исходных данных для расчета

Формула для расчета величины податливости демпфера $E_{\text{демп(расч)}}$, рад/(Н*м):

$$E_{\text{демп(расч)}} = \frac{6 \cdot l^2}{m \cdot E_{\text{мат}} \cdot n \cdot b \cdot h_{\text{ср}}^3 \cdot (R+1)}, \quad (1)$$

$$E_{\text{демп(расч)}} = \frac{6 \cdot 0,12^2}{24 \cdot 2,059 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 0,05 \cdot 0,006^3 \cdot (0,155+1)} = 7,00826 \cdot 10^{-7} \text{ рад/(Н*м)}$$

Формула для расчета величины крутильной жесткости демпфера $C_{\text{демп(расч)}}$, (Н*м/рад):

$$C_{\text{демп(расч)}} = 1/E_{\text{демп(расч)}}, \quad (2)$$

$$C_{\text{демп(расч)}} = 10^7/7,00826 = 1426887 \text{ Н*м/рад}$$

Отклонение полученной величины расчетной жесткости демпфера $C_{\text{демп(расч)}}$ от данных производителя $C_{\text{демп}}$: возможно рассчитать по формуле:

$$\Delta = \frac{C_{\text{демп(расч)}} - C_{\text{демп}}}{C_{\text{демп}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{1426887 - 1400000}{1400000} \cdot 100 = 1,92\%$$

Таким образом, формула, предложенная Ефремовым Л.В. и уточненная нами в части использования средней толщины рессорной пластины, позволяет с достаточной точностью (менее 2%) получить расчетную величину податливости и жесткости пружинного демпфера для проведения дальнейших расчетов крутильных колебаний судовых МДК.

Анализ формулы (1) показывает наиболее сильное влияние толщины пластины $h_{\text{ср}}$, что приводит к очевидному выводу об изменении жесткости пружин при их износе. То что износ пружины будет происходить именно по толщине можно заключить из механизма ее работы в демпфере (рис. 3) [11].

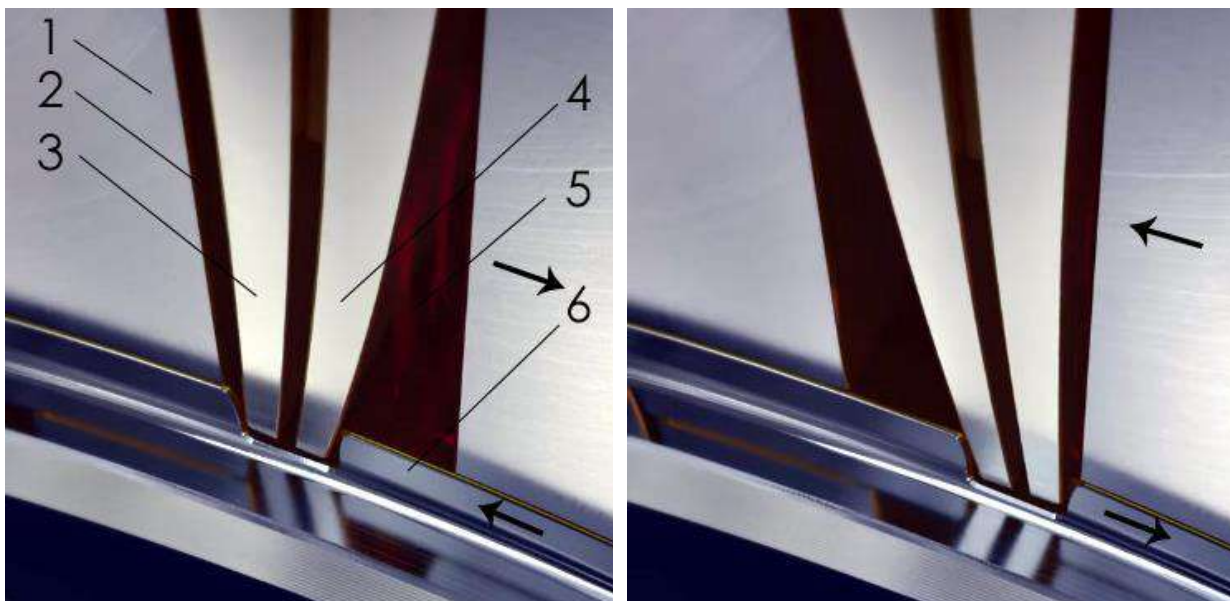


Рис. 3. Механизм работы пружин в демпфере «Geislinger» D60/14/2

Согласно рис. 3: 1 – вставка между пружинными пакетами; 2, 5 – полости для масла; 3, 4 – рессорные пружины; 6 – внутреннее колесо с проточками для установки пружин. При крутильных колебаниях пружины 3 и 4 изгибаются и попеременно открывают и закрывают полость для прохождения смазочного масла, при этом возникает упругий момент в пружинах и гидравлическое демпфирование в масле.

Согласно инструкции по эксплуатации демпфера «Geislinger» D60/14/2, предельный износ пружины определяется при помощи размещения измерительного щупа между пружинами, при этом, максимальная толщина щупа (характерная для предельного износа) составляет 0,36 мм. С учетом

двух пружин в пакете, предельный износ одной рессорной пружины составляет 0,18 мм. Это при средней толщине пружины 6 мм составляет 3%, при этом, предельная толщина пружины составит 5,82 мм. При толщине $h_{ср} = 5,82$ мм расчетную жесткость $S_{демп(расч)}$ можно оценить по формуле (1) и она составит 1302281,2 (Н*м/рад), что на 8,73% отличается от жесткости при номинальной толщине.

Для того, чтобы оценить насколько изменяется жесткость демпфера в зависимости от толщины стальных пружин, был произведен соответствующий расчет по результатам которого получена табл. 1 и график на рис. 4.

Таблица 1

Изменение расчетной жесткости демпфера при изменении толщины стальных пружин

Толщина $h_{ср}$, м	Расчетная жесткость, Н*м/рад	Изменение расчетной жесткости от исходной величины при номинальной толщине пружин, %
0,0055	1099066	-23,0
0,0056	1160112	-18,7
0,0057	1223377	-14,3
0,0058	1288902	-9,7
0,0059	1356725	-4,9
0,006	1426887	0,0
0,0061	1499427	5,1
0,0062	1574385	10,3
0,0063	1651800	15,8
0,0064	1731712	21,4
0,0065	1814161	27,1

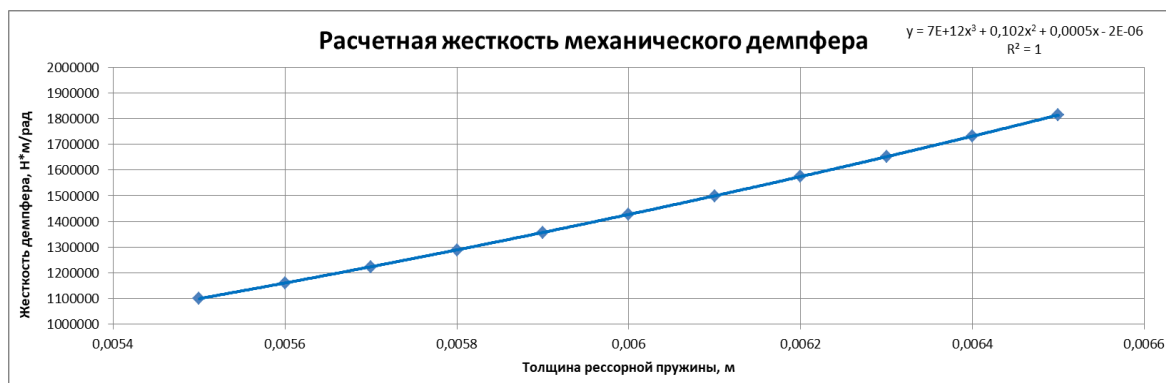


Рис. 4. Изменение расчетной жесткости демпфера в зависимости от толщины пружины

В результате можно получить расчетную формулу (4) для оценки крутильной жесткости демпфера C_D (Н*м/рад) модели «Geislinger» D60/14/2 в зависимости от толщины его стальных пружин h , (м):

$$C_D = 10^7 + 12 \cdot h^3 + 0,102 \cdot h^2 + 0,0005 \cdot h - 2 \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

Данная формула применима при следующих допущениях:

1. Формула (4) определена только для демпферов «Geislinger» D60/14/2 с изменением средней толщины пружины от 5,5 до 6,5 мм, для других моделей можно вывести формулу, согласно приведенной выше методики;
2. Изменение толщины пружины в сторону увеличения в данном примере использовалось для получения результатов в случае установки пружин нестандартной толщины;
3. При установке пружин из других материалов – сплавов, металлов (не стали) потребуются перерасчет жесткости с учетом величины модуля упругости материала пластин $E_{\text{мат}}$, МПа;
4. Износ пружин при эксплуатации считается для всех пружин одинаковым и равномерным;

5. Полученная расчетная оценка изменения жесткости является первым приближением для более точного решения поставленной задачи с учетом вышеуказанных допущений.

Заключение, выводы

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Величину крутильной жесткости пружинного демпфера возможно оценить с достаточной точностью (менее 2%) при наличии точных конструктивных размеров;
2. При наличии постоянных конструктивных параметров при эксплуатации демпфера наиболее значимым параметром для изменения его жесткости будет являться толщина пружины, которая уменьшается при износе;
3. Необходима расчетная оценка изменения амплитуд крутильных колебаний дизеля Wartsila 6L20 (или Wartsila 9L20) при различной толщине пружин демпфера, что позволит разработать расчетную методику безразборной оценки износа пружин в зависимости от изменения амплитуд крутильных колебаний.

Литература

1. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Прогноз состава флота судов смешанного «река-море» плавания до 2025 года с определением наиболее востребованных типов судов. Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск 2/2018. – с. 169 – 178 .
2. Иванченко А.А., Щенников И.А., Иванченко А.А. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2014. - №5(27). - С. 26-33.
3. Тип Волгонефть, проект 1577. [Электронный ресурс]: <https://fleetphoto.ru/projects/1775?ysclid=l8yle54lem451072594>
4. Обновление отечественного флота. Суда проекта RST27. [Электронный ресурс]: https://www.korabel.ru/news/comments/obnovlenie_otechestvennogo_flota_suda_proekta_rst27.html?ysclid=l8yk_tg6am6170297405
5. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. - СПб.: Наука, 2007. - 276 с.
6. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС. Л.: Судостроение, 1968. – 298 с.
7. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. НД №2-020101-152. СПб, 2022. – 115 с. (электронное издание).
8. Geislinger Damper Catalog Version 15.9, 2020. – 50 s.
9. Российский морской регистр судоходства. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009. СПб, 2022. – 411 с.
10. Instruction Manual. Wartsila 6L20. – 294 s.
11. Geislinger Damper | Torsional vibration steel spring damper. [Электронный ресурс]: <https://www.youtube.com/watch?v=PXjU20avQ28>

References

1. Egorov G.V., Egorov A.G. Prognoz sostava flota sudov smeshannogo «reka-more» plavanija do 2025 goda s opredeleniem naibolee vostrebovannyh tipov sudov [Forecast of the composition of the fleet of vessels of mixed "river-sea" navigation until 2025 with the definition of the most popular types of vessels]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. Special'nyj vypusk 2/2018. – s. 169 – 178 .
2. Ivanchenko A.A., Shhennikov I.A., Ivanchenko A.A. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova [Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet]. - 2014. - №5(27). - С. 26-33.
3. Tip Volgoneft', proekt 1577 [Volgoneft type, project 1577]. [Jelektronnyj resurs]: <https://fleetphoto.ru/projects/1775?ysclid=I8yle54lem451072594>
4. Obnovlenie otechestvennogo flota. Suda proekta RST27 [Renewal of the domestic fleet. Vessels of the RST27 project]. [Jelektronnyj resurs]: https://www.korabel.ru/news/comments/obnovlenie_otchestvennogo_flota_suda_proekta_rst27.html?ysclid=I8yk yk6am6170297405
5. Efremov L.V. Teorija i praktika issledovanij krutil'nyh kolebanij silovyh ustanovok s primeneniem komp'yuternyh tehnologij [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technology]. SPb.: Nauka, 2007. - 276 s.
6. Istomin P.A. Krutil'nye kolebanija v sudovyh DVS [Torsional oscillations in marine internal combustion engines]. L.: Sudostroenie, 1968. – 298 s.
7. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Chast' VII. Mehanicheskie ustanovki [Russian Maritime Register of Shipping. Rules of classification and construction of sea vessels. Part VII. Mechanical installations]. ND №2-020101-152. SPb, 2022. – 115 s. (jelektronnoe izdanie).
8. Geislinger Damper Catalog Version 15.9, 2020. – 50 s.
9. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Prilozhenija k rukovodstvu po tehničeskomu nabljudeniju za sudami v jekspluatacii [Russian Maritime Register of Shipping. Appendices to the manual on technical supervision of vessels in operation]. ND № 2-030101-009. SPb, 2022. – 411 s.
10. Instruction Manual. Wartsila 6L20. – 294 s.
11. Geislinger Damper | Torsional vibration steel spring damper. [Jelektronnyj resurs]: <https://www.youtube.com/watch?v=PXjU20avQ28>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Николаевич Покусаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: evt2006@rambler.ru

Mikhail N. Pokusaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: evt2006@rambler.ru

Константин Олегович Сибряев, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; e-mail: evt2006@rambler.ru

Konstantin O. Sibrayev, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: evt2006@rambler.ru

Максим Михайлович Горбачев, кандидат технических наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

Maksim M. Gorbachev, Ph.D. (Eng), Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: max9999_9@mail.ru

Адель Дамирович Ибадуллаев, аспирант, ассистент кафедры эксплуатации водного транспорта, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: adel.ibadullaev99@mail.ru

Adel D. Ibadullaev, graduate student, Assistant of the Department of Water Transport Operation, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: adel.ibadullaev99@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 06.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.10.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.057>

Учет и оптимизация издержек времени в рыбодобывающем процессе

С.В.Лисиенко¹ lisienkosv@mail.ru, Н.С. Иванко¹ ivns@mail.ru

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В статье рассматривается вопрос использования системного подхода к моделированию оптимальной добычи промыслового объекта. Для моделирования выбран промысловый объект – кальмар командорский (*Beryteuthis magister*). В Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне основной зоной его добычи является промысловая зона Северо-Курильская, удельный вес добычи кальмара командорского в этой зоне составляет около 80%. Моделирование рыбодобывающей деятельности основано на проведение оптимизации внутрипроизводственных издержек с учетом промысловой доступности объекта и использования добывающего флота, имеющего определенную технологию добычи водных биологических ресурсов. В статье так же рассмотрены промысловые издержки добывающих судов, указана их структура, и процентное соотношение потерь времени. В задаче оптимизации используются оценки средневзвешенного суточного вылова и промыслового времени для учета большинства издержек связанных с процессом добычи водных биологических ресурсов.

Ключевые слова: рыбодобывающая деятельность, водные биологические ресурсы, промысловые издержки, оптимизация, математическая модель

Для цитирования: Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Учет и оптимизация издержек времени в рыбодобывающем процессе, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 295—300.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.057>

Accounting and optimization of time costs in the fishing process

Svetlana V. Lisienko¹ lisienkosv@mail.ru, Nina S. Ivanko¹ ivns@mail.ru

¹ Far Eastern state technical fishery University, Russian Federation

Abstract. The article considers the issue of using a systematic approach to modeling optimal production of a field object. A commercial object was selected for modeling – the commander squid (*Beryteuthis magister*). In the Far Eastern fishery basin, the main area of its production is the North Kuril fishing zone, the specific weight of commander squid production in this zone is about 80%. The modeling of fishing activities is based on the optimization of in-production costs, taking into account the commercial availability of the facility and the use of a mining fleet with a certain technology for the extraction of aquatic biological resources. The article also considers the fishing costs of producing vessels, their structure is indicated, and the percentage of time losses. The optimization problem uses estimates of the weighted average daily catch and fishing time to account for most of the costs associated with the processes of extraction of aquatic biological resources.

Keywords: fishing activity, aquatic biological resources, fishing costs, optimization, mathematical model

For citation: Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko, Accounting and optimization of time costs in the fishing process, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 1, P. 295—300.

Введение

Сложность математического моделирования в области промышленного рыболовства связана в первую очередь со стохастическими процессами добычи и переработки водных биологических ресурсов. В связи с этим использование методов системного анализа при построении моделей в данной отрасли является актуальным и находит широкое применение [1,2,4,6,7,8,9].

С точки зрения системного подхода система это совокупность элементов и компонентов. Основное отличие первых от вторых в том, что элемент это наименьшая неделимая единица, а компонент может быть и элементом и набором элементов сгруппированных по определенным правилам и подчиняющихся определенной структуре. В целом компонент можно рассматривать как часть системы, т.е. подсистему.

Рассмотрим промысловую зону как экосистему, состоящую из элементов – промысловых объектов. Каждый промысловый объект обладает рядом «свойств», таких как период промысловой доступности, ореал обитания, возможность использования определенных орудий лова для добычи объекта, включение в приказ об установлении общих допустимых уловов и прочие.

Одним из промысловых объектов Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна является кальмар. Этот важный промысловый объект, который имеет высокую пищевую ценность. Одним из трех добываемых видов является кальмар командорский [3]. Почти 80% добычи кальмара командорского приходится на Северо-Курильскую зону.

Системный анализ добычи

Кальмар командорский в Северо-Курильской зоне доступен для добычи в течение 8 месяцев с апреля по ноябрь, таким образом, период промысловой доступности может быть разделен на периоды соответствующие продолжительности непрерывного пребывания в море добывающего судна определенного типа.

Добыча кальмара командорского ведется судами нескольких типов, таких как БМРТ, РТМ, СРТМ, ТСМ, СТР, РС, МРС. На каждом из представленных судов используется траловая технология добычи. Все эти типы судов можно разделить на две большие группы: добывающие суда с законченным производственным циклом (ДСЗ) и добывающие суда с незаконченным производственным циклом (ДСНЗ). К судам с законченным производственным циклом относятся суда типа БМРТ, РТМ, СРТМ, ТСМ, к судам с незаконченным производственным циклом относятся суда типа СТР, РС, МРС.

Работа добывающего судна в море может быть организована в автономной или экспедиционной формах. Пусть имеется n судов с законченным

производственным циклом и m судов с незаконченным производственным циклом. Тогда работа добывающего флота может быть организована следующим образом: n_1 судов ДСЗ работают в автономном режиме, вылов каждого из них составит A_i^a , n_2 судов ДСЗ работают в экспедиционном режиме, вылов каждого из них составит A_i^z , m_1 судов ДСНЗ работают в автономном режиме, вылов каждого из них составит A_j^a , m_2 судов ДСНЗ работают в экспедиционном режиме, вылов каждого из них составит A_j^z , при этом выполняются условия $n_1 \geq 0, n_2 \geq 0, n_1 + n_2 = n, m_1 \geq 0, m_2 \geq 0, m_1 + m_2 = m$, т.е. для каждого добывающего судна выбирается форма организации промысла.

Итоговый суммарный вылов, полученный добывающим флотом при добыче промыслового объекта, кальмара командорского, выражается как некоторая функция от выловов каждого судна:

$$A = F \left(\sum_{i=1}^{n_1} A_i^a, \sum_{i=1}^{n_2} A_i^z, \sum_{j=1}^{m_1} A_j^a, \sum_{j=1}^{m_2} A_j^z \right).$$

Модель получения суммарного вылова для промыслового объекта кальмара командорского представлена на рисунке 1.

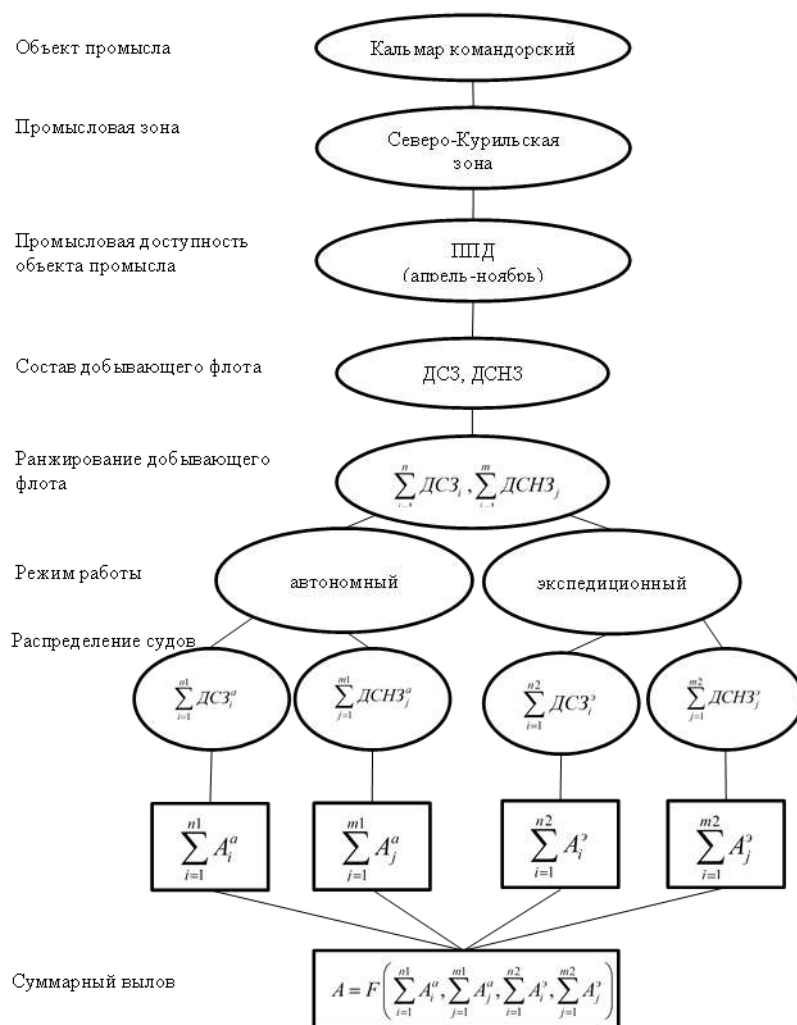


Рис. 1. Структурная схема определения вылова промыслового объекта

Анализ временных затрат

За время промысловой доступности объекта промысла, может быть выполнено не менее одного рейса. В общем случае это время можно представить как $t_{ППД} = N \cdot t_{ро}$, где $t_{ро}$ – время рейсообразота промыслового судна, N – количество рейсов.

Время рейсообразота раскладывается на две составляющие: время пребывания судна в портах $t_{п}$ и времени непрерывного пребывания судна в море $t_{м}$, таким образом $t_{п} < t_{м}$. Время непрерывного пребывания в море разделяется на время перехода $t_{пер}$ и время промысла $t_{пром}$, $t_{пром} < t_{м}$.

Время промысла определяется формой организации промысла и в нем выделяется время фактического лова. Этапы расчета времени лова с учетом потерь на каждом уровне были описаны в [5].

С учетом описанного выше структура времени лова и ее связь со временем промысловой доступности объекта представлена на рисунке 2.

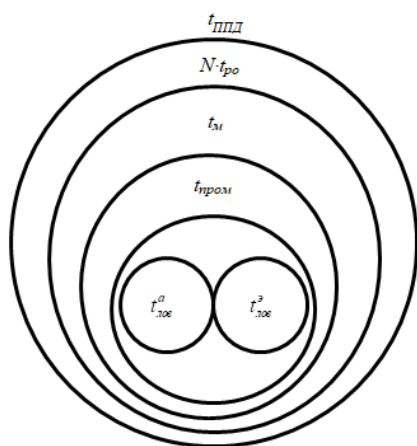


Рис. 2. Структура определения времени лова

Анализ данных показал, что промысел кальмара командорского ведется тремя типами судов: БМРТ, СРТМ, РТМ, доля добычи прочих типов судов менее 0,5% от общего вылова.

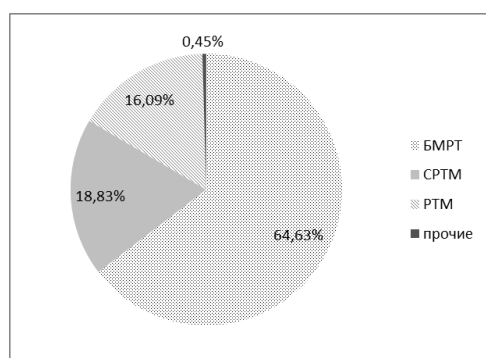


Рис. 3. Структура распределения добычи кальмара командорского по типам судов

За период апрель-ноябрь 2018 года на промысле кальмара командорского работали 83 судна от 28 организаций, большая часть из них это суда типа СРТМ, удельный вес судов этого типа составил 49,4%, 31,33% или 26 судов составили суда типа БМРТ, удельный вес судов типа РТМ составил 3,61%.

За время пребывания судна на промысле возникают промысловые потери времени связанные с переходом судна районами промысла, метеоусловиями, ведением хозяйственной деятельности и прочие.

Для всех трех типов судов наибольший удельный вес имеют операции лова, которые включают в себя такие операции как оперативный поиск, траление и прочие промысловые операции.

Наименьший удельный вес имеют операции перегруза, которые включают в себя бункеровку, выгрузку, получение снабжения и прочие грузовые операции. Как видно из таблиц эти операции занимают 2-4% промыслового времени.

Потери промыслового времени за счет выполнения переходов между районами промысла, для получения снабжения и для выполнения погрузочно-разгрузочных работ для судов типа БМРТ составляют в среднем 18,20% промыслового времени и колеблются от 1,25% в октябре до 16,10% в апреле.

Потери промыслового времени за счет выполнения переходов между районами промысла, для получения снабжения и для выполнения погрузочно-разгрузочных работ для судов типа РТМ составляют в среднем 2,11% промыслового времени и колеблются от 1,25% в октябре до 5,71% в мае.

Потери промыслового времени за счет выполнения переходов между районами промысла, для получения снабжения и для выполнения погрузочно-разгрузочных работ для судов типа СРТМ составляют в среднем 4,93% промыслового времени и колеблются от 1,32% в июне до 10,11% в мае.

Наибольший интерес представляют собой прочие потери времени при работе судна на промысле. Эти затраты включают в себя проведение ремонтных работы (ремонт судовых механизмов, ремонт промвооружения, ремонт орудий лова), потери времени при вынужденном ожидании (ожидание ГСМ, ожидание перегруза, ожидание снабжения, ожидание разрешения на лов, ожидание комплектования экипажа), метеоусловия (неблагоприятные погодные условия для ведения лова), аварийно-спасательные работы и оказание медицинской помощи, а так же иную деятельность не связанную непосредственно с ловом (прием и обработка рыбы, рабочие указания руководителя, хозяйственные работы, оформление официальных документов).

Структура прочих затрат для судов типа БМРТ, РТМ и СРТМ при вылове кальмара командорского представлена в таблице 1.

Таблица 1

Структура прочих затрат времени по каждому типу судна

N/N	Вид затрат	БМРТ	РТМ	СРТМ
1.	метеоусловия	7,61%	21,84%	30,60%
2.	вынужденное ожидание	10,47%	9,09%	12,75%
3.	ремонтные работы	17,54%	13,28%	20,70%
4.	спасательные работы	2,39%	0,00%	2,81%

Необходимо провести корректировку модели добычи с учетом временных затрат.

Оптимизация временных издержек

Основная цель это минимизация временных издержек за счет оптимизации деятельности и принятия управленческих решений соответствующих целям – максимизации добычи при определенных ограничениях, накладываемых на промысловую деятельность. Для формализации задачи обозначим $t_{проч,s}$ потеря промыслового времени вызванная причиной s . В зависимости от формы организации промысла (автономная или экспедиционная) набор причин потери времени будет различным[3].

$\theta_i^a = \sum_s t_{проч,s}(a, i)$ – суммарные потери промыслового времени судов ДСЗ работающих в автономном режиме. $\theta_j^a = \sum_s t_{проч,s}(a, j)$ – суммарные потери промыслового времени судов ДСНЗ работающих в автономном режиме. Аналогичным образом обозначены суммарные потери для судов ДСЗ и ДСНЗ работающих в экспедиционном режиме, т.е. $\theta_i^z = \sum_s t_{проч,s}(z, i)$, $\theta_j^z = \sum_s t_{проч,s}(z, j)$. Основная цель это минимизация суммарных потерь промыслового времени, т.е. поиск такого значения θ_{min} , которое соответствует наиболее эффективному распределению времени при ведении лова для выбранной формы организации промысла и типа

добывающего судна, т.е. $\theta_i^a \rightarrow min$, $\theta_j^a \rightarrow min$, $\theta_i^z \rightarrow min$, $\theta_j^z \rightarrow min$. В результате появляется резерв времени, который позволяет увеличить вылов за время $\Delta = \theta - \theta_{min}$ на величину ΔA , которая будет разной для разных типов судов и разных форм организации промысла, т.е. $\Delta A_i^a, \Delta A_i^z, \Delta A_j^a, \Delta A_j^z$ и тогда итоговый суммарный вылов составит

$$A = F \left(\sum_{i=1}^{n_1} A_i^a + \Delta A_i^a, \sum_{i=1}^{n_2} A_i^z + \Delta A_i^z, \sum_{j=1}^{m_1} A_j^a + \Delta A_j^a, \sum_{j=1}^{m_2} A_j^z + \Delta A_j^z \right).$$

Вследствие такой минимизации в структуре промыслового времени образуется временной интервал – «резерв», позволяющий проведение «резервных» промысловых операций, соответствующих одному производственному циклу, что может увеличить количественный показатель добычи – вылов, или проведение оптимизации внутрипроизводственных издержек.

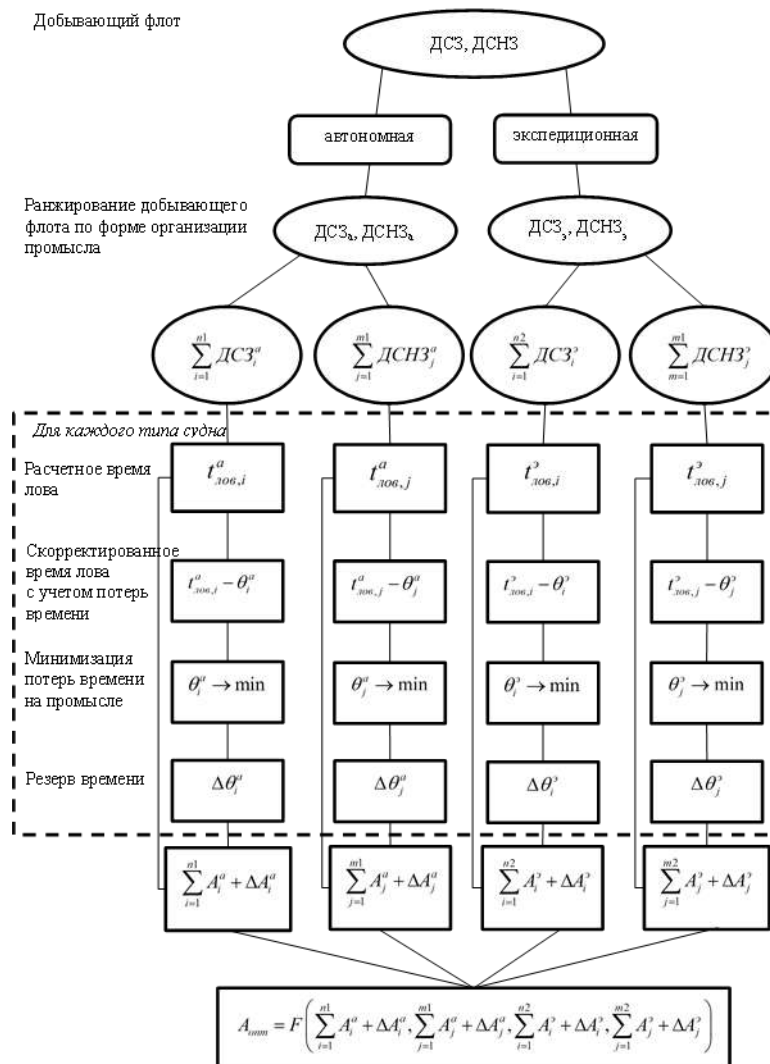


Рис. 3. Структурная схема определения вылова промыслового объекта с учетом минимизации временных затрат

Заключение

Предложенная схема представляет собой оптимизированную схему управления процессом добычи, основная цель которой оптимальное

управление и как следствие получение дополнительных резервов времени для увеличения числа тралений за сутки промысла.

Литература

1. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
2. Дверник А.В. Технология и управление промышленным рыболовством: Учебное пособие. М.: МОРКНИГА, 2013. – 318 с.
3. Иванко Н.С., Лисиенко С.В. Анализ освоения кальмаров Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна в 2017–2021 гг. // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 60, № 2. С. 23–32.
4. Лисиенко С. В. Системный подход к исследованию индустриальной логистической системы «промысловая зона» - научная основа совершенствования ведения добычи водных биологических ресурсов // Рыбное хозяйство. – 2016. № 5. С. 40 – 43.
5. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Планирование рейсообразота добывающих судов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 200-208. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.028.
6. Мельников В.Н. Общая характеристика основных видов математических моделей теории рыболовства//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2009. № 1. С. 17-22.
7. Мельников В.Н., Мельников А. В. Совершенствование общей теории промышленного рыболовства //Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.42-53.
8. Мельников В.Н., Мельников А. В. Системные исследования в теории промышленного рыболовства, аквакультуры и экологии //Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.32-41.
9. J. Finnis, E. Reid-Musson Managing weather & fishing safety: Marine meteorology and fishing decision-making from a governance and safety perspective. Marine Policy. 31 May 2022. Volume 142 (Cover date: August 2022), Article 105120. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105120>

References

1. Andreev M. N., Studenetskiy S. A. Optimal'noe upravlenie na promysle [Optimal management in the field]. – М.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. – 288 s.
2. Dvernik A.V. Tekhnologiya i upravlenie promyshlennym rybolovstvom [Technology and management of industrial fishing]: Uchebnoe posobie. М.: MORKNIGA, 2013. – 318 s.
3. Ivanko N.S., Lisienko S.V. Analiz osvoeniya kal'marov Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna v 2017–2021 gg [Analysis of the development of squid in the Far Eastern fishery basin in 2017-2021]. – Nauchnye trudy Dal'rybvtuza. 2022. T. 60, № 2. S. 23–32.
4. Lisienko S. V. Sistemnyy podkhod k issledovaniyu industrial'noy logisticheskoy sistemy «promyslovaya zona» - nauchnaya osnova sovershenstvovaniya vedeniya dobychi vodnykh biologicheskikh resursov [System approach to research on the "fishing zone" industrial logistic system as a scientific basis for the development of living resources harvesting] – Rybnoe khozyaystvo. – 2016. № 5. S. 40 – 43.
5. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Planirovanie rejsooborota dobyvayushchih sudov [Planning of the voyage turnover of producing vessels] – Morskie intellektual'nye tekhnologii 2021. № 2-1 (53). S. 200-208. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.028.
6. Mel'nikov V.N. Obshchaya harakteristika osnovnyh vidov matematicheskikh modelej teorii rybolovstva [General characteristic of basic types of mathematical models of the fishery theory] – Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo. 2009. № 1. S. 17-22.
7. Mel'nikov V.N., Mel'nikov A. V. Sovershenstvovanie obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva [Perfection of the general theory of industrial fishery] – Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo. 2010. № 1. s.42-53.
8. Mel'nikov V.N., Mel'nikov A. V. Sistemnye issledovaniya v teorii promyshlennogo rybolovstva, akvakul'tury i ekologii [Improvement of the general theory of industrial fishing] – Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo. 2010. № 1. s.32-41.
9. J. Finnis, E. Reid-Musson Managing weather & fishing safety: Marine meteorology and fishing decision-making from a governance and safety perspective. Marine Policy. 31 May 2022. Volume 142 (Cover date: August 2022), Article 105120. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105120>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Светлана Владимировна Лисиенко, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Svetlana V. Lisienko, Ph. D. (Econ), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern state technical fishery University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Нина Сергеевна Иванко, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б e-mail: invs@mail.ru

Nina S. Ivanko, graduate student of the Chair of Industrial Fisheries? Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B e-mail: invs@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 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**

Архипов А.В., Рыбников Н.И. Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр. Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 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 1800 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.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр. В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скорыходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**