

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)

1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100

0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101

110111001100101011110010101010010100111000101100101001100101111001010111100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001

1100110001110010011000101001010011110101010100001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU



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



THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE

№ 4 Часть 3 2022

№ 4 Part 3 2022

Morskie intelektual 'nye tehnologii



КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТРУДЫХ МЕЖДУНАРОДНОГО
БАЛТИЙСКОГО МОРСКОГО ФОРУМА

Proceedings X International Baltic Maritime Forum



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 3 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-](http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/)

[zhurnal/redakcionnaya-etika/](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



SSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 3 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, Information Management and Processing,
- 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

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. Plyushchaev**, 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**

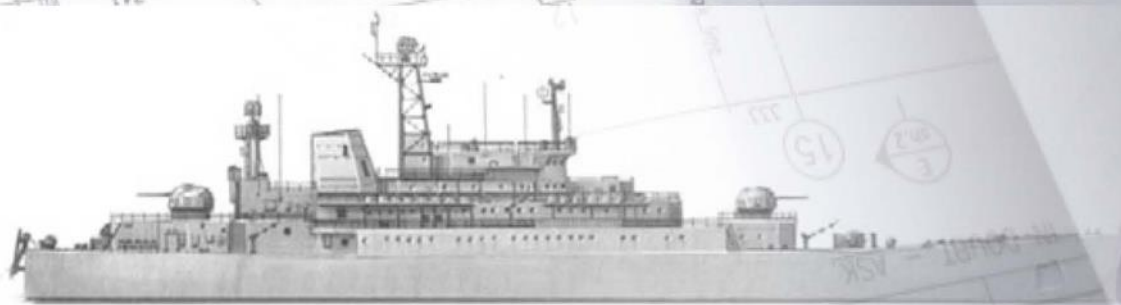
Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email: office@51cktis.ru

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.





**Калининградский государственный технический
университет**

**Труды
X Международного
Балтийского морского форума**

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
К 75-летию Игоря Григорьевича Захарова.....	13
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Бураковский П.Е., Бураковский Е.П., Юсып В.М. Конструктивные решения, повышающие безопасность мореплавания в условиях шторма.....	19
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бураковский П.Е., Бураковский Е.П., Юсып В.М. Исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность в условиях зарываемости судна в волну при движении косым курсом методом Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).....	27
Якута И.В. Анализ возможности увеличения контейнеровместимости и главных размерений контейнеровозов.....	33
Бураковский П.Е. Исследование влияния конструктивных элементов на гидродинамические силы и моменты, действующие на носовую оконечность судна в условиях ее зарываемости с использованием технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).....	39
Притыкин А.И. Особенности колебаний регулярных перекрытий с одним стрингером при разном конструктивном оформлении.....	46
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Ковальчук Л.И., Бураковская М.В., Яворский И.М. Формирование многофакторной модели для функционального диагностирования топливной аппаратуры судовых дизелей.....	53
Кажекин И.Е. Управление феррорезонансным контуром в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью.....	59
Белей В.Ф., Коротких К.В. Рекомендации по повышению эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода.....	65
Корнева И.П., Синявский Н.Я., Кострикова Н.А. Исследование судовых моторных масел с продуктами износа оптическими методами.....	72
Белей В.Ф., Коротких К.В., Самарин В.Д. Результаты экспериментальных исследований нелинейных нагрузок системы электроснабжения объекта морской индустрии.....	79
Кажекин И.Е. Перенапряжения при однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью в условиях несимметрии фазных емкостей.....	86
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Дудаков М.О., Дудакова Д.С. Модернизированные варианты дночерпателя Экмана-Берджи с дополнительным сенсорным и вычислительным оборудованием для автоматизации захвата и оценивания качества пробы.....	92
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ	
Гнатюк В.И., Кивчун О.Р. Ковалёв А.А., Зайцев А.А. Разработка индекса оптимальной физической активности для морских специалистов.....	100
Гнатюк В.И., Кивчун О.Р. Методика прогнозирования электропотребления объектов на основе значений ранговых фазовых углов.....	105
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
Великанов Н.Л., Наумов В.А. Анализ судовой гидравлической системы сбора и перекачки нефтесодержащих вод.....	110
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ	
Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическое моделирование дифферента рыболовного судна при выборке кошелькового невода.....	116

CONTENTS	page
For Igor Zakharov's 75-th anniversary.....	13
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Pavel E. Burakovskiy, Evgeny P. Burakovskiy, Vyacheslav M. Yusyp Design solutions that increase the safety of navigation in storm conditions.....	19
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Pavel E. Burakovskiy, Evgeny P. Burakovskiy, Vyacheslav M. Yusyp Investigation of hydrodynamic forces acting on the bow under conditions of ship burrowing into a wave while moving in an oblique course using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method.....	27
Irina V. Yakuta Analysis of the possibility of increasing container capacity and main dimensions of container ships.....	33
Pavel E. Burakovskiy. Investigation of the influence of structural elements on the hydrodynamic forces and moments acting on the bow of the ship in conditions of its burrowing using technology Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).....	39
Alexej I. Pritykin Peculiarities of vibration of the regular grillage with one stringer and different design.....	46
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Leonid I. Kovalchuk, Marina V. Burakovskaya, Igor M. Yavorskiy Formation of a multifactorial model for functional diagnostics of marine diesel fuel equipment.....	53
Ilya E. Kazhekin Control of a ferroresonant circuit in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral.....	59
Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh Recommendations for improving the efficiency of the transformer park of a shipyard power supply system.....	65
Irina P. Korneva, Nikolai Ya. Sinyavsky, Natalya A. Kostrikova Study of marine motor oils with wear products by optical methods.....	72
Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh, Vasiliy D. Samarin. The results of experimental studies of non-linear loads of a marine industry facility's electrical power supply system.....	79
Ilya E. Kazhekin, Overvoltage by single-phase faults in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral in conditions of asymmetry of phase capacities.....	86
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Mikhail O. Dudakov, Dina S. Dudakova Modernized versions of the Ekman-Burgey bottom grab with additional sensor and computing equipment for automating the capture and evaluation of sample quality	92
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Oleg R. Kivchun, Viktor I. Gnatyuk, Alexander A. Kovalev, Anatoly A Zaitsev Development of the optimal index physical activity for marine specialists.....	100
Victor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun The method of forecasting the power consumption of objects based on the values of the rank phase angles.....	105
COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION	
Nikolay L. Velikanov, Vladimir A. Naumov Analysis of the vessel hydraulic system for collecting and pumping oily waters.....	110
MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES	
Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov, Mathematical modeling of the trim of a fishing vessel when purse seine sampling.....	116

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).

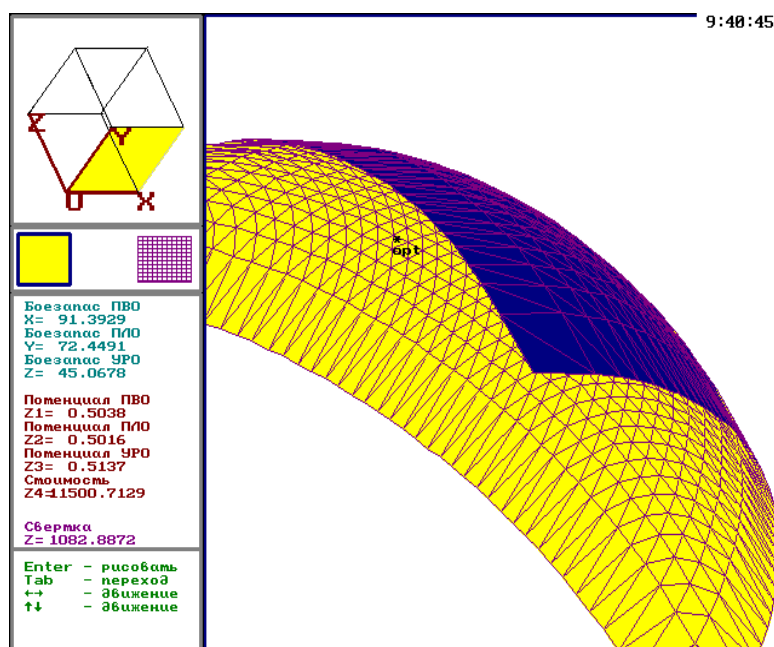


Рис. 4. Визуализация области Парето

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).

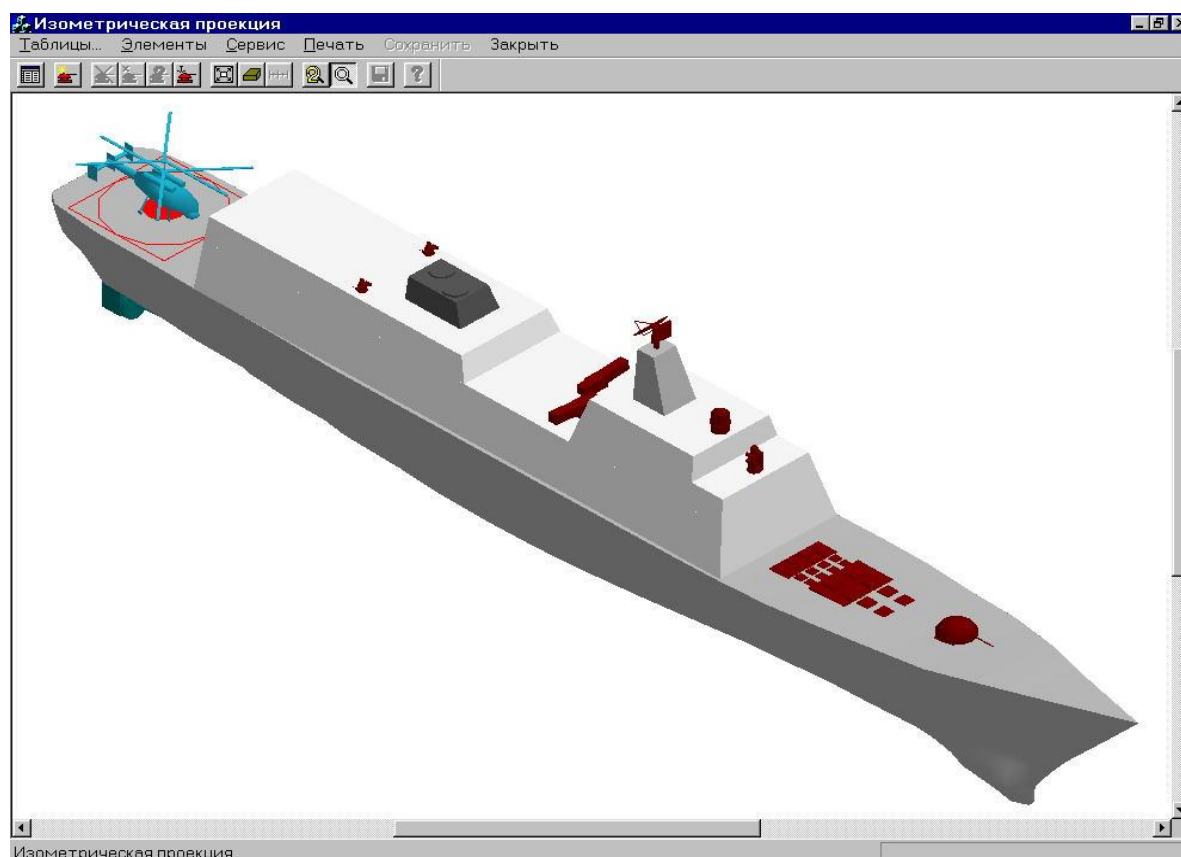


Рис.5. 3-D проекция исследовательского проекта фрегата

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).

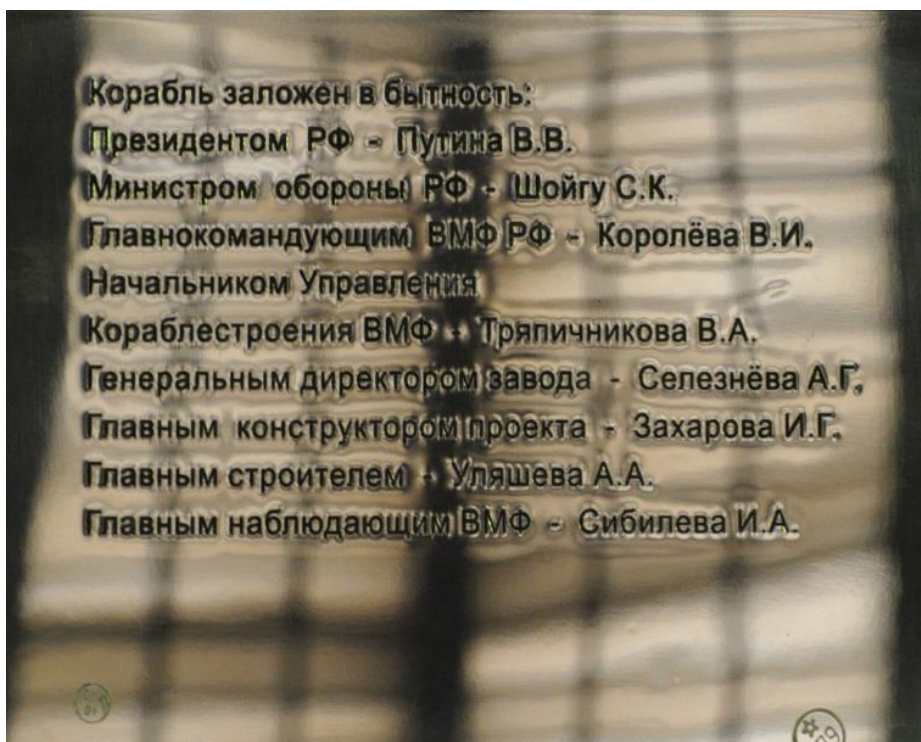


Рис.6. Закладная доска Корвета. Гл. конструктор И.Г. Захаров

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 629.5.015+629.5.024.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.058>

Конструктивные решения, повышающие безопасность мореплавания в условиях шторма

П.Е. Бураковский¹, paul_b@mail.ru, Е.П. Бураковский², e_burakovsky@mail.ru,
В.М. Юсуп², v-y48@yandex.ru

¹Калининградский государственный технический университет, ²ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» (филиал в г. Калининграде)

Аннотация. Одной из наиболее распространенных причин гибели морских судов было и остаётся воздействие на них штормового моря, в частности известны многочисленные случаи разрушения носовых оконечностей крупнотоннажных судов. Особую опасность для судоходства представляет воздействие аномальных волн, механизм взаимодействия которых с корпусными конструкциями существенно отличается от традиционно рассматриваемого при проектировании судов. В настоящей статье разработана математическая модель, позволяющая оценивать вероятность встречи судов и других объектов морской техники с аномальными волнами при произвольных направлениях их движения. Предложенный аппарат может быть использован в рамках концепции формализованной оценки безопасности для определения рисков эксплуатации объектов морской техники и принятия оптимальных конструктивных решений при их проектировании. Для повышения безопасности судов в штормовых условиях авторами разработан ряд новых технических решений, не имеющих аналогов в мировой практике и защищенных патентами Российской Федерации на изобретение. Данные технические решения могут быть отнесены к одному из трёх направлений: конструктивные решения, направленные на ограничение величины гидродинамических нагрузок, действующих на носовую оконечность в условиях её зарываемости в волну; конструкции, позволяющие ограничить зарываемость носовой оконечности в волну; инновационные решения по конструированию корпусов судов с изменяемой геометрией носовой оконечности. Применение этих конструктивных решений может способствовать существенному повышению безопасности мореплавания в штормовых условиях.

Ключевые слова: зарываемость в волну, аномальные волны, потеря остойчивости, разрушение корпуса, гидродинамические нагрузки, отрыв носовой оконечности, изменяемая геометрия носовой оконечности, успокоитель продольной качки.

Для цитирования: Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. Конструктивные решения, повышающие безопасность мореплавания в условиях шторма, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 19—26.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.058>

Design solutions that increase the safety of navigation in storm conditions

Pavel E. Burakovskiy¹ paul_b@mail.ru, Evgeny P. Burakovskiy², e_burakovsky@mail.ru,
Vyacheslav M. Yusyp², v-y48@yandex.ru

¹ Kaliningrad State Technical University, ² Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. One of the most common reasons for the loss of ships was and remains the impact of a stormy sea, in particular, there are numerous cases of destruction of the bows of large-tonnage ships. Of particular danger to navigation is the impact of anomalous waves, the mechanism of interaction of which with hull structures differs significantly from that traditionally considered in the design of ships. In this article, a mathematical model has been developed that allows estimating the probability of encountering ships and other objects of marine equipment with anomalous waves in arbitrary directions of their movement. The proposed apparatus can be used within the framework of the concept of a formalized safety assessment to determine the risks of operating marine facilities and make optimal design decisions in their design. To improve the safety of ships in stormy conditions, the authors have developed a number of new technical solutions that have no analogues in world practice and are protected by patents of the Russian Federation for invention. These technical solutions can be attributed to one of three areas: design solutions aimed at limiting the magnitude of hydrodynamic loads acting on the bow in conditions of its burrowing into a wave; structures that allow limiting the burrowing of the bow into the wave; innovative solutions for the design of ship hulls with variable bow geometry. The use of these design solutions can contribute to a significant increase in the safety of navigation in stormy conditions.

Key words: burrowing into a wave, anomalous waves, loss of stability, hull destruction, hydrodynamic loads, separation of the bow, variable geometry of the bow, pitch stabilizer.

For citation: Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Vyacheslav M. Yusyp Design solutions that increase the safety of navigation in storm conditions. 2022. № 4 part 3, P. 19—26.

Введение

Одной из наиболее распространенных причин гибели морских судов было и остаётся воздействие штормового моря. Многочисленные случаи разрушения носовых оконечностей крупнотоннажных судов описаны в [1]. Только в течение восьми дней, с 27 декабря 1980 г. по 3 января 1981 г., вблизи берегов Японии произошло шесть катастрофических случаев с пятью навалочными и одним сухогрузным судами, принадлежавшими разным странам. Навалочник «Ономичи мару», построенный в Японии в 1965 г., во время рейса из США в Японию с грузом угля при сильном шторме потерял носовую оконечность, которая отломилась в районе концов продольных комингсов квадратного люка первого трюма. Судно двигалось под углом 20° к волне со скоростью 5 уз против зыби высотой 8–9 м. В один из моментов бак скрылся под водой, а когда он вновь всплыл, то был сильно прогнут вниз. Прогиб постепенно увеличивался, и, наконец, через 2 часа носовая часть судна полностью отломилась от остального корпуса.

Одним из наиболее неблагоприятных сценариев взаимодействия судна с волной является зарывание носовой оконечности судна в волну. Как отмечено в [2] наиболее опасная форма заливаемости наблюдается при больших скоростях судов. Вкатившаяся на палубу сплошная масса воды представляет большую угрозу разрушения надпалубных конструкций. При интенсивном заливании известны случаи проседания палуб [2].

На опасность заливаемости ещё почти полвека назад указывал Н.В. Барабанов [3]: «При плавании во время жестокого шторма всегда возникает необходимость уменьшения скорости судна, так как любое судно в балластном переходе может быть сломано в результате ударов носовой оконечностью о воду или в результате ударов вкатывающейся на палубу воды при заливании».

Так, танкер «Kirki», перевозивший 82665 тонн нефти, в условиях шторма к вечеру 20 июля 1991 года получил дифферент на нос (рис. 1) вследствие поступления воды в носовой балластный танк [4]. В результате этого усилилась заливаемость носовой оконечности и гидродинамические нагрузки, действующие на палубу судна, в результате чего утром 21 июля 1991 произошёл отрыв носовой оконечности в районе 93 шпангоута (рис 2).

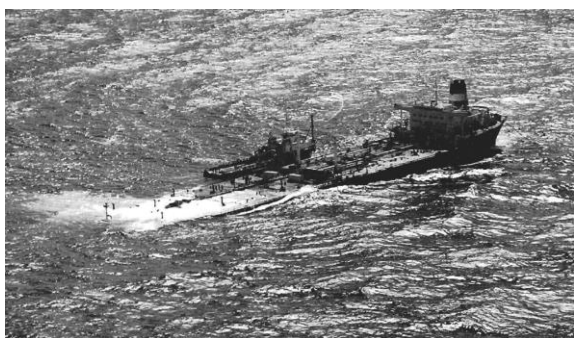


Рис. 1. Танкер «Kirki» с дифферентом на нос [4]

В результате официального расследования точную причину отрыва носовой оконечности установить не удалось. Металлографические исследования показали, что разрушение пластин палубы носило вязкий характер и было связано с большими перегрузками. В качестве предполагаемой причины были названы воздействия со стороны моря, усугубляемые наличием воды в носовом балластном танке, в комбинации с коррозионным износом корпуса, эффектом от ремонтных работ и движением судна со слишком большой скоростью в условиях штормового моря.



а)



б)

Рис. 2. Отрыв носовой оконечности танкера «Kirki» [5]

Исследования, проведенные авторами [6, 7, 8], показали, что при зарывании носовой оконечности в волну на плоских поверхностях палубы могут развиваться гидродинамические силы и моменты значительной величины, под действием которых судно может произойти опрокидывание судна или разрушение его корпуса, чем и могло послужить причиной рассмотренной выше аварии.

При этом возможна реализация нетрадиционных схем разрушения корпуса, связанных с отрывом носовой и кормовой оконечностей. Так, шведский танкер «Avanti» разломился на три части во время шторма у берегов в Восточно-Китайском море к югу от Японии 8 января 1953 года. При этом носовая и кормовая оконечности судна некоторое время оставались на поверхности, а средняя часть сразу затонула [9].

Одной из причин гибели морских судов, в том числе и крупнотоннажных, является воздействие на

них аномальных волн [10]. Такие волны характеризуются большей крутизной и иным направлением движения частиц, по сравнению с ветровыми волнами, поэтому характер их взаимодействия с корпусными конструкциями судов существенно отличается от традиционно рассматриваемого.

Так, по данным [3] теплоход «Н. Карамзин» у тихоокеанского побережья Японии подвергся воздействию группы крутых десятиметровых волн, которые приближались к судну отвесной стеной. Под их воздействием крен судна достигал 35–40°.

Волны большой крутизны регистрировались и у побережья Исландии, их высота составляла 21,3 м при длине 220 м, и 16,7 м при длине около 50 м соответственно [3].

Известны случаи, когда в условиях шторма носовые оконечности отрывались сразу у нескольких кораблей, находящихся в одном районе. Так, отряд кораблей японского флота в южных морях Тихого океана попал в центр тайфуна. При этом два эсминца потеряли носовые оконечности и затонули. С крейсера «Нати», входившего в состав японской эскадры, при аварии сфотографировали треугольную крутую волну высотой около 20 м и длиной 150–200 м. Такие необычно крутые волны часто наблюдаются в центральной части циклонов [2].

Данные наблюдений за поверхностью Мирового океана со спутников свидетельствуют о том, что волны высотой 25–30 метров и более не являются редкостью [10]. Волна высотой 25,6 м была инструментально зафиксирована с нефтяной платформы в Северном море, аномальные волны высотой более 10 м наблюдались в Чёрном море [10].

Поэтому для оценки рисков, возникающих при осуществлении морехозяйственной деятельности, необходимо располагать математическими моделями, позволяющими оценить вероятность воздействия аномальных волн на объекты морской техники. Снижение риска может быть достигнуто путем внедрения новых конструктивных решений, некоторые из которых представлены в настоящей статье.

1. Обобщенная вероятностная модель встречи морских судов с аномальными волнами

В статье [11] была разработана математическая модель, позволяющая оценить вероятность встречи судна с волной-убийцей для случая движения таких волн в одном направлении. В рамках данной модели аномалии образовывали пуассоновское поле, а их параметры (скорость движения, полуширина, время жизни) представляли собой случайные величины. Однако в реальных условиях аномальные волны могут воздействовать на суда и другие объекты морской техники с разных направлений. Поэтому в настоящей статье представлена математическая модель, позволяющая определить вероятность встречи судна с аномальными волнами для случая произвольного направления их движения.

Для модели аномалий применяются так называемые мерцающие пуассоновские потоки [11]. Их использование обусловлено тем, что каждая аномалия возникает в случайный момент времени, существует в течение некоторого случайного промежутка времени, а затем исчезает.

С основными допущениями, используемыми при построении модели можно ознакомиться в [11].

Усложним модель [11], считая характеристики аномалий зависимыми от направления их распространения (анизотропия явления). Это оправдывается тем, что основными факторами, влияющими на появление аномалий и их характеристики, для акватории являются:

- глубина и рельеф дна;
- господствующие течения;
- господствующие ветра.

Учёт приведенных выше факторов сразу предполагает зависимость рассматриваемых параметров аномалий от направления их движения.

Таким образом, к характеристикам простой модели аномалии добавляется направление её распространения φ : $\chi = (\theta, \rho, v, \varphi)$, а пространство $H = R_+^3 \times [0, 2\pi[$. Здесь согласно [11] ρ – случайная полуширина аномалии; v – случайная скорость аномалии; θ – случайное время жизни аномалии; χ – случайная характеристика аномалии; H – пространство всех возможных значений характеристик аномалий. Схема движения аномалий представлена на рис. 3.

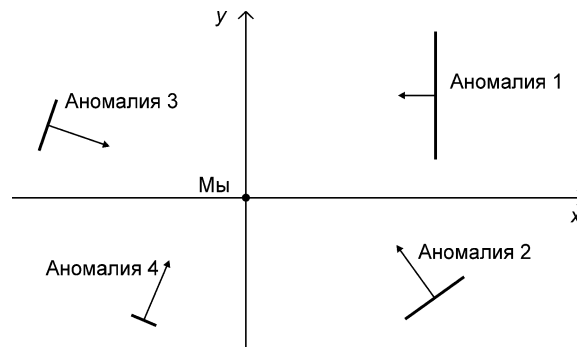


Рис. 3. Схема движения аномалий

Обозначим условное математическое ожидание произведения $\theta \cdot v \cdot \rho$ относительно φ

$$M(w) = M(\theta \cdot v \cdot \rho | \varphi) \big|_{\varphi=w} \quad (1)$$

Тогда из упрощённой модели [11] вытекает, что условная опасность встречи с аномалиями относительно φ будет

$$D(T, w) = 2 \cdot I \cdot T \cdot M(\theta \cdot v \cdot \rho | \varphi) \big|_{\varphi=w} = 2 \cdot I \cdot T \cdot M(w), \quad (2)$$

где I – плотность интенсивности пуассоновского потока аномалий;

T – промежуток времени, в течение которого осуществляется наблюдение.

Опасность встречи с аномалиями, направление которых лежит в интервале углов $[w_0, w_1]$ будет равна

$$D(T, w_0, w_1) = 2 \cdot I \cdot T \cdot \int_{w_0}^{w_1} M(w) \cdot f_\varphi(w) dw, \quad (3)$$

где $f_\varphi(w)$ – плотность распределения аномалий в зависимости от направления w .

Рассмотрим случай, когда время жизни аномалии θ , её полуширина ρ и скорость v являются независимыми случайными величинами. Предположим, кроме того, что эти величины не зависят от курсового угла φ . Тогда формула (3) может быть преобразована к виду:

$$D(T, w_0, w_1) = 2 \cdot I \cdot T \cdot M_0 \cdot M_p \cdot M_v \cdot \int_{w_0}^{w_1} f_\varphi(w) dw, \quad (4)$$

где M_0 – математическое ожидание времени жизни аномальной волны;

M_p – математическое ожидание полуширины;

M_v – математическое ожидание скорости.

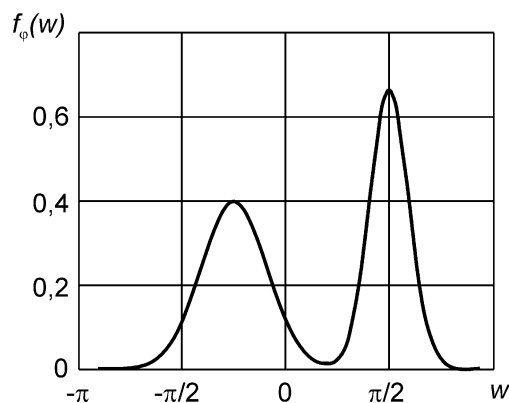


Рис. 4. Плотность распределения курсовых углов аномалий

Пусть имеется два доминирующих направления движения аномальных волн, при этом плотность распределения φ определяется рис. 4.

Результаты расчёта представлены на рис. 5. В расчётах принималось, что математическое ожидание скорости аномалий $M_v = 7$ м/с, математическое ожидание их полуширины варьировалось. На основании наблюдений аномальных волн со спутника, результаты которых приведены в [11], для выполнения расчёта было принято $I \cdot M_0 = 5,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2}$. Предполагалось, что судно эксплуатируется в течение двадцати пяти лет, проводя половину этого срока в открытом море.

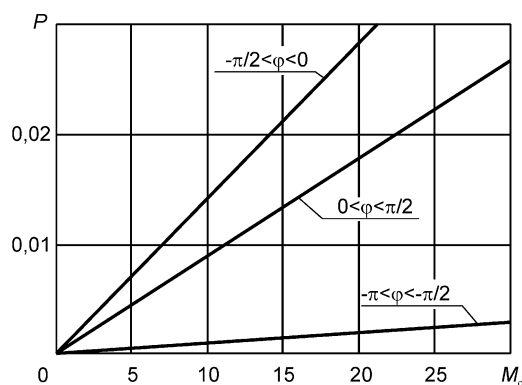


Рис. 5. Вероятность встречи судна с аномальными волнами, движущимися с различных направлений

На рис. 5 показана вероятность встречи судна с аномальными волнами, идущими с определенных направлений. Первая кривая соответствует курсовым углам от $-\pi$ до $-\pi/2$, вторая кривая – диапазону от $-\pi/2$ до 0, третья – диапазону от 0 до $\pi/2$. Видно, что вероятность встречи с волнами из первого диапазона курсовых углов существенно ниже, чем из двух других.

Следует заметить, что если рассматривается вероятность встречи судна с аномалиями, идущими

с любого направления, т.е. если интегрирование в формуле (4) ведется от $-\pi$ до $+\pi$, то она преобразуется к виду

$$D(T) = 2 \cdot I \cdot T \cdot M_0 \cdot M_p \cdot M_v. \quad (5)$$

Такая же зависимость была получена в [11], где рассматривались аномалии, движущиеся лишь в одном направлении, т.е. в случае независимости указанных выше случайных величин может быть использован аппарат, представленный в [11].

Таким образом, разработанная в настоящей статье математическая модель с использованием подходов, изложенных в [11], позволяет решать задачу оценки встречи объектов морской техники с аномальными волнами в более общей постановке, что существенно расширяет возможности её применения.

2. Инновационные конструктивные решения, направленные на повышение безопасности мореплавания в условиях шторма

Для повышения безопасности судов в штормовых условиях авторами был предложен ряд новых технических решений, не имеющих аналогов в мировой практике и защищенных патентами Российской Федерации на изобретение. Данные технические решения могут быть отнесены к одному из трёх направлений:

- конструктивные решения, направленные на ограничение величины гидродинамических нагрузок, действующих на носовую оконечность в условиях её зарываемости в волну;
- конструкции, позволяющие ограничить зарываемость носовой оконечности в волну;
- инновационные решения по конструированию корпусов судов с изменяемой геометрией носовой оконечности.

Наряду с конструктивными решениями был разработан инновационный способ контроля устойчивости судна в штормовых условиях при зарываемости в волну, позволяющий предотвратить гибель судов [12, 13]. Реализация данного способа включает в себя моделирование динамики судна на развитом встречном волнении в условиях зарывания носовой оконечности в волну, определения гидродинамических сил и моментов и оценку устойчивости судна с использованием трансформированной диаграммы статической устойчивости.

3. Конструктивные решения, направленные на ограничение гидродинамических сил и моментов при зарывании носовой оконечности в волну

Следует отметить, что для судов с традиционной конструкцией корпуса общая прочность может быть обеспечена путём соответствующего увеличения момента сопротивления поперечных сечений корпуса. Однако это не позволит повысить безопасность мореплавания, так как не исключает гибели судна от опрокидывания. Учитывая данное обстоятельство, авторами был разработан комплекс инновационных конструктивных решений, позволяющих уменьшить величину гидродинамических сил и моментов в случае зарываемости носа судна в волну. Предложенные конструкции направлены на улучшение гидродинамических характеристик носовых

оконечностей при их обтекании в вертикальном направлении (от палубы к днищу) в случае зарывания в волну. Для достижения указанного технического результата было решено ограничить величину плоских поверхностей в носовой оконечности корпуса судна, свойственных традиционной конструкции. В частности, была разработана конструкция обтекателя носовой оконечности судна [6], которая даёт возможность снизить величину вертикальной гидродинамической силы почти в три раза.

На рис. 6 представлена конструкция носовой оконечности нового типа [14], позволяющая существенно уменьшить величину гидродинамических воздействий. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – основная часть носовой оконечности; 2 – бульбовая наделка; 3 – переходная часть носовой оконечности. В предложенной конструкции как основная часть носовой оконечности, так и бульбовая наделка, выполняются в виде прямых круговых цилиндров, оси которых расположены параллельно.

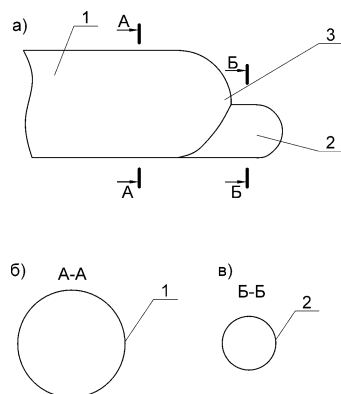


Рис. 6. Конструкция носовой оконечности, позволяющая снизить гидродинамические нагрузки: а) – общий вид носовой оконечности; б) – поперечное сечение основной части корпуса; в) – поперечное сечение бульбовой наделки

Нужно отметить, что предложенная конструкция позволяет исключить асимметрию обтекания корпуса судна, даже при наличии крена судна, что существенно снижает величину кренящего момента и боковой силы, стремящейся развернуть судно лагом к волне. К тому же, за счёт обтекания бульбовой наделки в вертикальной плоскости будет создаваться дополнительный восстанавливающий момент (рис. 7, где ДП – диаметральной плоскости; u – суммарная скорость обтекания носовой оконечности вследствие продольной качки и движения частиц в волне; P_z – вертикальная составляющая гидродинамической силы; M_B – восстанавливающий момент).

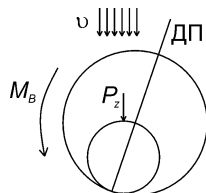


Рис. 7. Схема возникновения восстанавливающего момента при обтекании предлагаемой носовой оконечности в случае её зарывания в волну

Необходимо отметить, что при реализации данной конструкции существенно снижается величина боковой силы P_y , так как основная часть корпуса в носовой оконечности и бульбовая наделка выполняются симметричными относительно своих осей. Благодаря этому судно не будет разворачиваться лагом к волне при зарывании носа.

Таким образом, предложенная конструкция благодаря своей обтекаемой форме позволяет существенно снизить величину вертикальной гидродинамической силы P_z , а симметричная форма поперечных сечений способствует снижению величины кренящего момента и боковой силы P_y , что повышает безопасность судов в условиях зарывания носовой оконечности в волну.

4. Конструктивные решения, позволяющие уменьшить качку судна и зарываемость носовой оконечности в волну

Повысить безопасность судов в штормовых условиях, когда вследствие зарываемости носовой оконечности возможна гибель судна от потери прочности или остойчивости, можно также за счёт уменьшения продольной качки судна и ограничения зарывания носовой оконечности в волну. В частности, авторами было предложено несколько конструкций крыльев-стабилизаторов [6], устанавливаемых в носовой оконечности, открывающихся при движении носовой оконечности вниз, и прижимающихся к корпусу при её движении вверх. Кроме того, была разработана конструкция фальшборта с поворотными секциями [6], которая позволяет создать гидродинамическую силу, препятствующую погружению носовой оконечности в волну.

Также была предложена крыльевая система судна [15], применение которой способствует существенному уменьшению зарываемости носа судна в волну (рис. 8). На рисунке обозначено: 1 – корпус судна; 2 – крыло-стабилизатор; 3 – заслонка; 4 – шарнир; 5 – упор; 6 – упругий элемент.

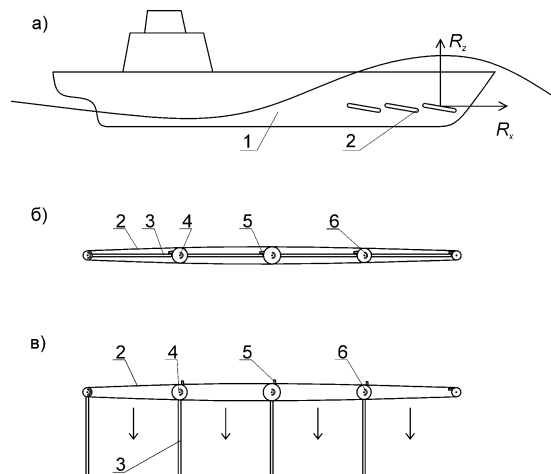


Рис. 8. Конструкция крыльевой системы судна: а) – схема установки крыльев-стабилизаторов; б) – заслонки в закрытом положении (погружение носовой оконечности); в) – заслонки в открытом положении (всплытие носовой оконечности)

При погружении носовой оконечности заслонки закрываются, поворачиваясь в шарнирах, формируя плоскость крыла-стабилизатора. За счёт этого

создается гидродинамическая сила R_z , препятствующая зарыванию носовой оконечности в воду. Когда носовая оконечность начинает движение вверх, заслонки открываются, и сила сопротивления всплытию носовой оконечности уменьшается. При этом происходит поворот заслонок относительно шарниров с преодолением сопротивления упругих элементов.

Установка крыльев-стабилизаторов под углом к горизонтальной плоскости позволяет создать дополнительную силу R_x , действующую в направлении движения судна. Эта сила будет способствовать повышению устойчивости судна на курсе, а также препятствовать его развороту лагом к волне.

5. Конструирование корпусов судов с изменяемой геометрией носовой оконечности

Другим направлением совершенствования корпусных конструкций судов для повышения их безопасности в штормовых условиях является разработка технических решений, связанных с изменением геометрии носовой оконечности.

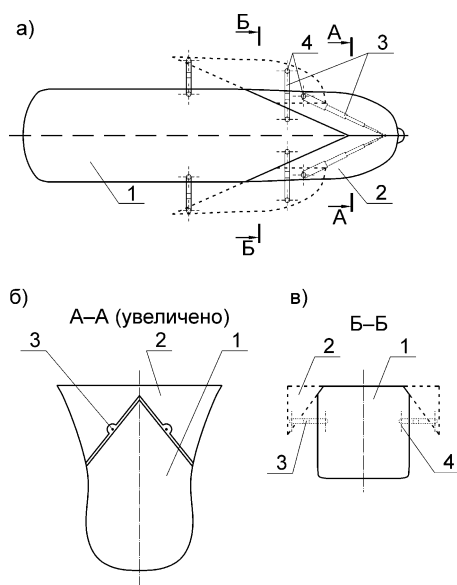


Рис. 9. Конструкция корпуса судна с изменяемой геометрией носовой оконечности: а) – общий вид корпуса судна; б) – сечение А-А; в) – сечение Б-Б

В таком случае геометрия носовой оконечности судна может быть приспособлена к соответствующим условиям эксплуатации. Некоторые из разработанных авторами конструктивных решений приведены в [6].

Ниже представлена инновационная конструкция (рис. 9), позволяющая изменять гидродинамические характеристики носовой оконечности за счет смещения булей [16].

На рисунке обозначено: 1 – основная часть корпуса; 2 –були; 3 – гидроцилиндры; 4 – оси. В данном техническом решении корпус судна выполняется в виде основной части и булей, устанавливаемых в носовой оконечности. При этом були соединяются с основной частью корпуса посредством гидроцилиндров, что позволяет регулировать их положение относительно основной части.

Следует отметить, что в предлагаемой конструкции основная часть корпуса характеризуется завалом борта в носовой оконечности и обратным наклоном форштевня, в результате чего после перемещения булей носовая оконечность будет прорезать набегающие волны, и нагрузки на неё будут существенно ниже, чем на традиционную конструкцию, характеризующуюся наличием больших плоских поверхностей в носовой оконечности. Смещение булей от диаметральной плоскости судна позволяет повысить поперечную остойчивость за счёт резкого повышения момента инерции площади ватерлинии относительно продольной оси.

Заключение

Разработанные математические модели делают возможной оценку вероятности встречи объектов морской техники с аномальными волнами в условиях произвольных параметров их движения. Предложенный аппарат может быть использован в рамках концепции формализованной оценки безопасности [17] для определения рисков эксплуатации объектов морской техники и принятия оптимальных конструктивных решений при их проектировании.

Анализ динамики судна в условиях штормового моря показал, что носовые оконечности судов традиционной конструкции подвергаются существенным гидродинамическим нагрузкам, приложенным к палубе при зарывании в волну, что нередко приводит к гибели судов от потери прочности или остойчивости. Поэтому в настоящей работе предлагаются новые конструктивные решения, позволяющие существенно повысить безопасность мореплавания в условиях сильного волнения. При этом для широкого внедрения этих конструктивных решений в практику необходимо внесение изменений в соответствующие разделы правил классификационных обществ [18].

Литература

1. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций / Н.В. Барабанов, Н.А. Иванов, В.В. Новиков, Г.П. Шемендюк. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
2. Барабанов Н.В. Конструкция корпуса морских судов: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. В 2 т. Т.1. Общие вопросы конструирования корпуса судна. СПб.: Судостроение, 1993. 304 с.
3. Повреждения судовых конструкций / Н.В. Барабанов [и др.]. Л.: Судостроение, 1977. 400 с.
4. Departmental investigation into the loss of the bow section of the Greek registered motor tanker KIRKI the subsequent fire, evacuation of the crew and salvage operation from 20 July 1991 to 23 August 1991. Report No. 33 / Department of Transport and Communications. Australia, 1992. 126 p.
5. Baird D., Gilbert T. Review and Morphology of Maritime Pollution Emergencies // MARPOLSER 98. Metocean services for marine pollution emergency response operations, Townsville, Australia, 13-17 July 1998. Proceedings. Volume 2. Review and information papers. NO. 44, part 2 (WMO/TD-No. 960). Geneva: WMO, 1999. P. 1–15.

6. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография. СПб.: Лань, 2020. 300 с.
7. Бураковский П.Е. Экспериментальное исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в процессе захвата ее волной // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный выпуск 1. С. 146–152.
8. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. Оценка влияния главных размерений судна на гидродинамические моменты, действующие на носовую оконечность в условиях ее захвата волной, с использованием технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации : материалы V нац. науч.- техн. конф. Электрон. дан. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2022. С. 195–200.
9. Tanker Broke In Three // Central Queensland Herald (Rockhampton). 1953. 15 January. P. 21.
10. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Волны-убийцы. Современные проблемы океанологии. Выпуск 1. Севастополь, 2006. 43 с.
11. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Оценка вероятности встречи морских судов с аномальными волнами // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4(46), т. 4. С. 10–15.
12. Пат. 2740617 Российская Федерация, МПК В63В 39/14, В63В 39/00, G05D 1/00. Способ контроля остойчивости судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2019130780; заявл. 27.09.2019; опубл. 15.01.2021, бюл. №2. 11 с.
13. Гречиков М.И., Грушников В.А. Наиболее значимые судостроительные инновации года // Компетентность / Competency (Russia). – 2022. № 5. С. 46–55.
14. Пат. 2761360 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Носовая оконечность корпуса судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2021111637; заявл. 22.04.2021; опубл. 07.12.2021, бюл. №34. 9 с.
15. Пат. 2748811 Российская Федерация, МПК В63В 39/06, В63В 43/00. Крыльевая система судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». № 2019124160; заявл. 25.07.2019; опубл. 31.05.2021, бюл. №16. 6 с.
16. Пат. 2743677 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Корпус судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». № 2019121971; заявл. 09.07.2019; опубл. 24.02.2021, бюл. №6. 9 с.
17. Решетов Н.А., Захаров А.А. Формализованная оценка безопасности и ее влияние на судоходную индустрию // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. Вып. 27. 2004. С. 7–13.
18. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский Морской Регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2018. 209 с.

References

1. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Shemendyuk G.P. Povrezhdeniya i puti sovershenstvovaniya sudovykh konstruksiy [Damage and ways to improve ship structures]. 2 issue., revised and expanded. Leningrad, Sudostroenie, 1989. 256 p.
2. Barabanov N.V. Konstruktsiya korpusa morskikh sudov: uchebnik [The design of the hull of marine vessels] 2 issue., revised and expanded. In 2 volumes. Volume 1. Obshchie voprosy konstruirovaniya korpusa sudna [General issues of ship hull design]. Saint Petersburg, Sudostroenie, 1993. 304 p.
3. Barabanov N.V. and others. Povrezhdenie sudovykh konstrukcij [Damage to ship structures]. Leningrad, Sudostroenie, 1977. 400 p.
4. Departmental investigation into the loss of the bow section of the Greek registered motor tanker KIRKI the subsequent fire, evacuation of the crew and salvage operation from 20 July 1991 to 23 August 1991. Report No. 33, Australia, Department of Transport and Communications, 1992. 126 p.
5. Baird D., Gilbert T. Review and Morphology of Maritime Pollution Emergencies. MARPOLSER 98. Metocean services for marine pollution emergency response operations, Townsville, Australia, 13-17 July 1998. Proceedings. Volume 2. Review and information papers. NO. 44, part 2 (WMO/TD-No. 960). Geneva, WMO, 1999, pp. 1–15.
6. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Konstruktivnoe obespechenie bezopasnosti moreplavaniya: monografiya [Constructive provision of navigation safety: monograph]. Saint Petersburg, Lan', 2020. 300 p.
7. Burakovskiy P.E. (2019). Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' sudna v protsesse zakhvata ee volnoy [Experimental study of hydrodynamic forces acting on the bow tip of the vessel during its capture by a wave]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, special issue 1, pp. 146–152.
8. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusup V.M. Ocenka vliyanija glavnih razmerenij sudna na gidrodinamicheskie momenty, deystvuyushchie na nosovuyu okonechnost' v usloviyah ee zahvata volnoj, s ispol'zovaniem tehnologii Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [Evaluation of the influence of the main dimensions of the vessel on the hydrodynamic moments acting on the bow in the conditions of its capture by a wave, using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) technology]. Innovacionnoe razvitie rybnoj otrasli v kontekste obespecheniya prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii : proceedings of V national scientific and technical conference. Vladivostok : Dal'rybvuz, 2022, pp. 195–200.
9. Tanker Broke In Three. Central Queensland Herald (Rockhampton). 1953, 15 January, p. 21.
10. Dotsenko S.F., Ivanov V.A. Volny-ubiytsy [Rogue waves]. Sovremennye problemy okeanologii. Vypusk 1. Sevastopol', 2006. 43 p.

11. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. (2019). Otsenka veroyatnosti vstrechi morskikh sudov s anomal'nymi volnami [Estimation of the probability of meeting sea vessels with anomalous waves]. Morskoe intellektual'nye tekhnologii, №4(46), vol. 4, pp.10–15.
12. Patent 2740617 Russian Federation, IPC B63B 39/14, B63B 39/00, G05D 1/00. Sposob kontrolya ostoychivosti sudna [Vessel stability control method]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2019130780; filled 27.09.2019; published 15.01.2021, bulletin №2. 11 p.
13. Grechikov M.I., Grushnikov V.A. (2022) Naibolee znachimye sudostroitel'nye innovatsii goda [The most significant shipbuilding innovations of the year]. Competency (Russia), № 5, pp. 46–55.
14. Patent 2761360 Russian Federation, IPC B63B 1/06, B63B 43/02. Nosovaya okonechnost' korpusa sudna [Bow of the ship's hull]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2021111637; filled 22.04.2021; published 07.12.2021, bulletin №34. 9 p.
15. Patent 2748811 Russian Federation, IPC B63B 39/06, B63B 43/00. Kryl'evaya sistema sudna [Vessel wing system]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2019124160; filled 25.07.2019; published 31.05.2021, bulletin №16. 6 p.
16. Patent 2743677 Russian Federation, IPC B63B 1/06, B63B 43/02. Nosovaya okonechnost' korpusa sudna [Bow of the ship's hull]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2019121971; filled 09.07.2019; published 24.02.2021, bulletin №6. 9 p.
17. Reshetov N.A., Zakharov A.A. (2004) Formalizovannaya otsenka bezopasnosti i ee vliyanie na sudokhodnuyu industriyu [Formalized safety assessment and its impact on the shipping industry]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva, issue 27, pp. 7–13.
18. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of ships]. Part II. Hull. Saint-Petersburg, Russian register of shipping, 2018. 209 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 532.582.4+629.5.015

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.059>

Исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность в условиях зарываемости судна в волну при движении косым курсом методом Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

П.Е. Бураковский¹ paul_b@mail.ru, Е.П. Бураковский² e_burakovsky@mail.ru, В.М. Юсып² v-y48@yandex.ru

¹Калининградский государственный технический университет, ²ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» (филиал в г. Калининграде)

Аннотация. В процессе зарывания носовой оконечности судна в волну и омывания её водой возникает система гидродинамических сил и опрокидывающих моментов при резко сниженной или почти обнуленной метацентрической высоте. При этом возникающая боковая сила стремится развернуть судно лагом к волне, в результате чего последующее погружение и выход из условий захвата будет осуществляться при движении судна не перпендикулярно набегающему волнению, а с некоторым углом φ . При движении косым курсом к бегу волн несимметричность давления будет возрастать, что в конечном итоге приведет к еще большему увеличению кренящих моментов, что резко увеличивает опасность гибели судов. В настоящей работе с использованием метода SPH и программного пакета DualSPHysics выполнено исследование гидродинамических сил и моментов, действующих на носовую оконечность судна при его движении косым курсом в условиях зарываемости носовой оконечности в волну. На исследуемой модели показано существенное влияние фальшборта на величину гидродинамических сил и моментов: наличие фальшборта приводит к росту опрокидывающего момента почти на 42%. При этом гидродинамический опрокидывающий момент в случае движения косым курсом при наличии фальшборта может быть почти на порядок больше восстанавливающего по абсолютной величине. Отмечено, что использование традиционной формы носовой оконечности судов не позволяет судам, идущим носом на волну в условиях зарываемости их носовой оконечности, держать курс неизменным, так как судно постоянно будет разворачивать на движение косым курсом, что чрезвычайно опасно. Представлены рекомендации по проектированию носовых оконечностей судов для повышения безопасности мореплавания.

Ключевые слова: зарываемость в волну, гидродинамическая сила, кренящий момент, встречное волнение, фальшборт, угол крена, SPH, косой курс, разворот лагом к волне, проектирование носовой оконечности.

Для цитирования: Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М. Исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность в условиях зарываемости судна в волну при движении косым курсом методом Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Морские интеллектуальные технологии 2022. № 4 часть 3, С. 27—32.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.059>

Investigation of hydrodynamic forces acting on the bow under conditions of ship burrowing into a wave while moving in an oblique course using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method

Pavel E. Burakovskiy¹ paul_b@mail.ru, Evgeny P. Burakovskiy² e_burakovsky@mail.ru,
Vyacheslav M. Yusyp² v-y48@yandex.ru

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, ² Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In the process of burying the bow of the vessel into a wave and washing it with water, a system of hydrodynamic forces and overturning moments arises at a sharply reduced or almost zero metacentric height. In this case, the emerging lateral force tends to turn the vessel sideways to the wave, as a result of which the subsequent immersion and exit from the conditions of capture will be carried out when the vessel moves not perpendicular to the oncoming wave, but with a certain angle φ . When moving obliquely to the run of the waves, the pressure asymmetry will increase, which will ultimately lead to an even greater increase in heeling moments, which sharply increases the risk of ship destruction. In the present work, using the SPH method and the DualSPHysics software package, a study was made of the hydrodynamic forces and moments acting on the bow of the vessel when it moves in an oblique course under conditions of the bow being buried in a wave. The model under study shows a significant effect of a bulwark on the magnitude of hydrodynamic forces and moments: the presence of a bulwark leads to an increase in the overturning moment by almost 42%. In this case, the hydrodynamic overturning moment in the case of an oblique course in the presence of a bulwark can be almost an order of magnitude greater than the restoring moment in absolute value. It is

noted that the use of the traditional shape of the bow of the ships does not allow ships heading into the wave in conditions of burrowing of their bow, keep the course unchanged, since the ship will constantly turn to move in an oblique course, which is extremely dangerous. Recommendations for the design of the bows of ships to improve the safety of navigation are presented.

Key words: burrowing into a wave, hydrodynamic force, heeling moment, head wave, bulwark, heel angle, SPH, oblique heading, turn with a lag to a wave, bow design.

For citation: Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Vyacheslav M. Yusyp Investigation of hydrodynamic forces acting on the bow under conditions of ship burrowing into a wave while moving in an oblique course using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. 2022. № 4 part 3, P. 27—32.

Введение

Основной причиной гибели судов в открытом море являются, как правило, штормовые условия, когда на суда обрушиваются волны большой разрушительной силы. Суда стараются по возможности избегать таких сильных штормов, однако это не всегда удается, так как циклоны могут резко менять направление движения.

В работах [1, 2, 3, 4, 5] исследовались закономерности распределения гидродинамических усилий при движении судна носом на волну в условиях его зарываемости. Показано, что в этом случае наблюдаются значительные кренящие моменты, которые могут привести к гибели судна в результате его опрокидывания.

1. Постановка задачи

В процессе зарывания носовой оконечности судна в волну и омывания её водой возникает система гидродинамических сил и опрокидывающих моментов при резко сниженной или почти обнуленной метацентрической высоте. Кроме того, экспериментальные исследования авторов показали, что в процессе качки судна возникающая боковая сила стремится развернуть судно лагом к волне, в результате чего последующее погружение и выход из условий захвата будет осуществляться при движении судна не перпендикулярно набегающему волнению, а с некоторым углом φ . При этом, чем больше колебаний осуществляет судно, тем сильнее его разворачивает лагом к волнению. Изменение траектории движения судна ведет и к изменению гидродинамических сил и моментов, действующих на носовую оконечность корпуса судна.

При движении косым курсом к бегу волн несимметричность давления будет возрастать, что в конечном итоге приведет к еще большему увеличению кренящих моментов, что резко увеличивает опасность гибели судов.

2. Методы исследования

В настоящей работе сделана попытка, используя метод SPH [6, 7, 8] и программный пакет DualSPHysics [9, 10], исследовать гидродинамические силы, действующие на носовую оконечность судна при его движении косым курсом в условиях зарываемости носовой оконечности.

Исследования проводились на модели судна, выполненной в масштабе 1:100, с отношением $B/H=2$ (H – высота борта; B – ширина палубы судна).

В процессе эксперимента при фиксированных углах θ и β определялись усилия, действующие на модель в направлении ее обтекания C_{zz}^θ , усилия, действующие в перпендикулярном направлении C_{yz}^θ и

опрокидывающий момент $\bar{m}_{zy}$. Для удобства анализа результатов расчета все искомые величины представлены в безразмерном виде:

$$C_{zz}^\theta = \frac{R_{zz}^\theta}{R_{zz}^0}, \quad (1)$$

$$C_{yz}^\theta = \frac{R_{yz}^\theta}{R_{zz}^0}, \quad (2)$$

$$\bar{m}_{zy} = \frac{M_{zy}}{M_{\max M}}, \quad (3)$$

где R_{zz}^θ – сила, действующая на модель в направлении обтекания при ее развороте на угол θ ;

R_{zz}^0 – сила, действующая на модель в направлении обтекания при $\theta=0$;

R_{yz}^θ – сила, действующая на модель в направлении, перпендикулярном направлению обтекания, при развороте модели на угол θ ;

M_{zy} – гидродинамический момент;

$M_{\max M}$ – восстанавливающий момент, определяемый согласно [11, 12].

Общий вид трехмерной модели представлен на рис. 1, а схема установки модели в лотке на рис. 2.

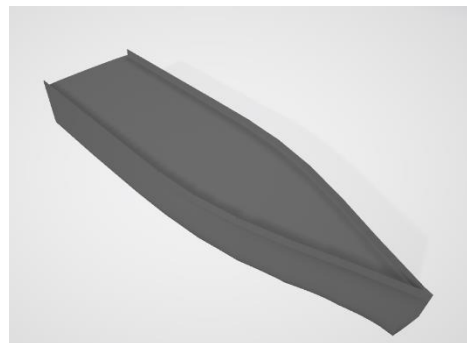


Рис. 1. Общий вид трехмерной модели

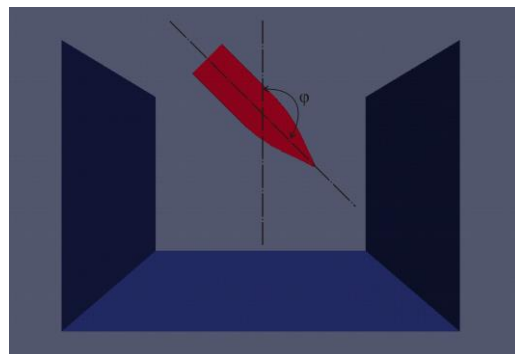


Рис. 2. Схема установки модели в лотке при моделировании косого курса

Методика проведения эксперимента состоит в обдувании модели в лотке с последовательным изменением угла крена θ и курсового угла φ (рис. 3).

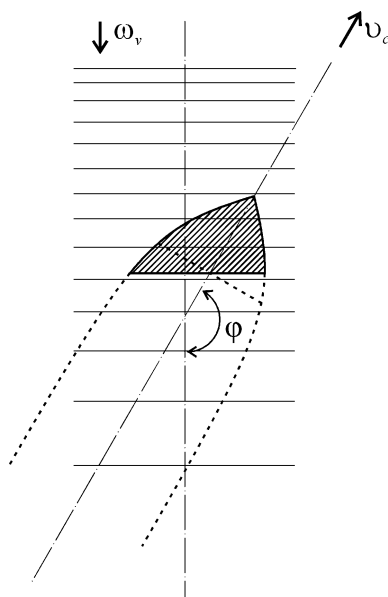


Рис. 3. Схема движения судна косым курсом

При этом угол крена θ варьировался в диапазоне от 0° до 90° , а курсовой угол φ в диапазоне от 180° до 135° . Были испытаны модели без фальшборта и с фальшбортом, угол развала которого β варьировался ($\beta = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\beta = -30^\circ$). Процесс испытания модели в лотке представлен на рис. 4.

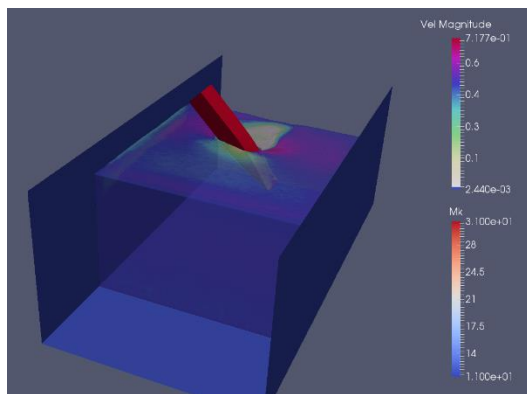


Рис. 4. Процесс испытания носовой оконечности, моделирующей косой курс движения судна

3. Результаты и их обсуждение

Типовые кривые распределения гидродинамических сил представлены на рис. 5-7. Так, на рис. 5 представлены закономерности изменения вертикальных гидродинамических усилий, действующих на носовую оконечность корпуса судна. На рис. 6 представлены гидродинамические усилия, действующие на носовую оконечность в направлении, перпендикулярном направлению движения судна. На рис. 7 представлено изменение гидродинамического момента при вариации угла крена θ и курсового угла φ .

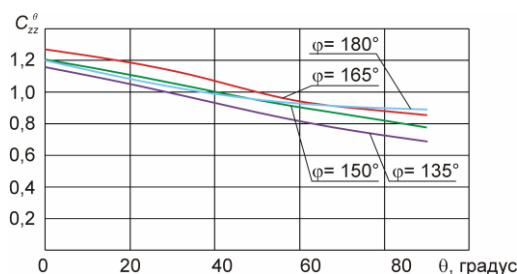


Рис. 5. Зависимость вертикальных усилий от угла крена для носовой оконечности с фальшбортом при $\beta = 45^\circ$

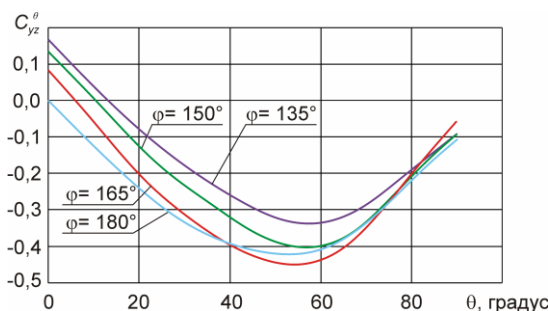


Рис. 6. Усилия, действующие перпендикулярно направлению движения судна для носовой оконечности с фальшбортом при $\beta = 45^\circ$

Анализ результатов математического эксперимента позволяет сделать следующие выводы. Так, вертикальные усилия, действующие на носовую оконечность при развале фальшборта на угол $\beta = 45^\circ$, составляют максимальное значение при угле крена $\theta = 0^\circ$ $C_{zz}^0 \approx 1,3$ при курсовом угле $\varphi = 165^\circ$, а минимальные значения $C_{zz}^0 \approx 0,7$ при угле крена $\theta = 90^\circ$ при курсовом угле $\varphi = 135^\circ$.

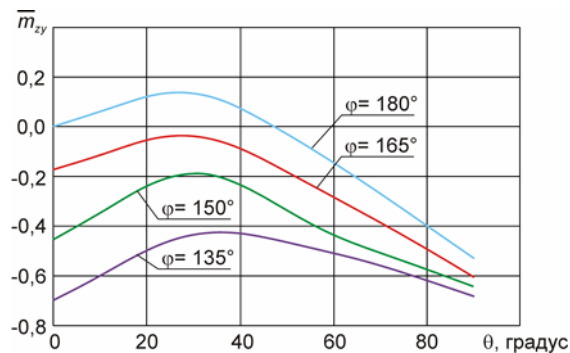


Рис. 7. Зависимость гидродинамических моментов от угла крена при различных курсовых углах для носовой оконечности с фальшбортом при $\beta = 45^\circ$

При испытании носовой оконечности без фальшборта максимальное усилие $C_{zz}^0 \approx 1,0$, т.е. примерно на 30% ниже, чем у носовой оконечности с развалом фальшборта на угол $\beta = 45^\circ$. Таким образом, увеличение вертикальной нагрузки за счёт установки фальшборта с углом развала $\beta = 45^\circ$ составляет примерно 30%. На моделях оконечности судна с другими углами развала фальшборта максимальное значение C_{zz}^0 наблюдается также при $\theta = 0^\circ$ и варьируется в диапазоне $C_{zz}^0 \approx 1,0 \div 1,3$.

На рис. 6 представлено изменение гидродинамических усилий, направленных перпендикулярно скорости движения судна. Максимальное их значение достигается при угле крена $\theta=55^\circ-60^\circ$ и составляет для носовой оконечности без фальшборта $C_{yz}^0 = -0,27$, а при наличии фальшборта $C_{yz}^0 \approx -0,45$, т.е. почти на 60% больше. Другими словами, наличие фальшборта резко увеличивает боковые усилия.

На рис. 7 представлены закономерности изменения гидродинамических моментов на носовой оконечности корпуса судна при зарывании носовой оконечности в процессе движения косым курсом. Видно, что по мере увеличения курсового угла гидродинамический кренящий момент практически сразу из положительного (восстанавливающий) превращается в опрокидывающий, даже уже при курсовом угле $\varphi = 165^\circ$. Дальнейшее увеличение курсового угла ведет лишь к резкому увеличению гидродинамического кренящего момента. Так, на носовой оконечности без фальшборта, кренящий момент при курсовом угле $\varphi=135^\circ$ увеличивается до $\bar{m}_{zy} \approx -0,2$ при $\theta=50^\circ$ с $\bar{m}_{zy} \approx 0,12$ (восстанавливающий гидродинамический момент) при курсовом угле $\varphi = 180^\circ$. При $\theta=0^\circ$ и курсовом угле $\varphi = 45^\circ$ кренящий момент максимален и достигает $\bar{m}_{zy} \approx -0,5$.

На носовой оконечности с фальшбортом при его развале $\beta=45^\circ$ закономерности изменения гидродинамического момента сохраняются, с той лишь разницей, что значение кренящего момента достигает $\bar{m}_{zy} \approx -0,42$ при угле крена $\theta=40^\circ$, а наибольшее значение кренящего момента $\bar{m}_{zy} \approx -0,7$ наблюдается при $\theta=0^\circ$. Видно, что наличие фальшборта практически на 40% увеличивает максимальный гидродинамический кренящий момент.

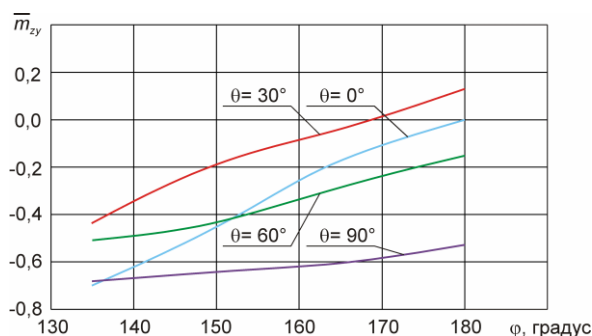


Рис. 8. Зависимость кренящего момента от курсового угла для ряда значений угла крена для носовой оконечности с фальшбортом при $\beta = 45^\circ$

Из рис. 8 видно, что гидродинамический момент сильно зависит от курсового угла и резко возрастает с его увеличением.

4. Учёт особенностей гидродинамического взаимодействия носовой оконечности с волной при проектировании судов

Для повышения безопасности мореплавания с учётом отмеченных выше особенностей авторами был разработан способ определения формы носовой оконечности корпуса судна [13], позволяющий

осуществлять выбор оптимальной формы носовой оконечности корпуса судна среди экспериментально проверенных моделей с учетом кренящего момента, боковых гидродинамических сил и трансформации диаграммы статической остойчивости судна при зарывании в волну носовой оконечности.

Реализация данного способа предполагает предварительное задание нескольких форм носовой оконечности корпуса судна и проведение испытаний моделей с заданными формами с целью определения их гидродинамических характеристик по методике, представленной выше. Полученные гидродинамические характеристики моделей позволяют осуществлять математическое моделирование качки судна в условиях зарывания в волну носовой оконечности и определение гидродинамических нагрузок на палубу [5], что позволяет построить трансформированную диаграмму статической остойчивости судна и диаграмму гидродинамического кренящего момента [2]. При этом оптимальная форма носовой оконечности судна, обеспечивающая его безопасность в условиях зарываемости в волну, определяется путём сопоставления трансформированных диаграмм статической остойчивости для судна с разными формами носовой оконечности.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

- Гидродинамический опрокидывающий момент при движении косым курсом при наличии фальшборта резко аннигилирует восстанавливающий гидродинамический момент и создает кренящий гидродинамический момент, почти на порядок больше восстанавливающего (по абсолютной величине).

- Движение судна косым курсом в условиях зарываемости его носовой оконечности недопустимо, так как сопряжено почти со стопроцентной вероятностью его гибели из-за опрокидывания.

- Учитывая, что при движении носом на волну ($\varphi = 180^\circ$) возникает система гидродинамических сил, включающая гидродинамическую силу, действующую поперек направлению движения, ответственную за разворот судна на некоторый угол $\Delta\varphi$, при котором резко возрастают кренящие моменты, необходимо проектировать форму носовой оконечности таким образом, чтобы свести поперечную гидродинамическую силу как можно ближе к нулевому значению [13].

- Выход кормовой оконечности из воды (даже частичный) при зарывании носовой оконечности в волну создает условия для сокращения присоединенных масс в кормовой оконечности, что облегчит разворот корпуса судна на некоторый угол $\Delta\varphi$.

- При зарывании носовой оконечности в волну гидродинамические силы генерируются при омывании палубы и бортового перекрытия, а так как их площадь почти на два порядка больше, чем площадь пера руля, то и разворот судна будет происходить с угловой скоростью, примерно на два порядка выше, чем при циркуляции судна.

– Использование традиционной формы носовой оконечности судов не позволяет судам, идущим носом на волну в условиях зарываемости их носовой оконечности, держать курс неизменным, так как его постоянно будет разворачивать на движение косым курсом, что чрезвычайно опасно.

– На исследуемой модели показано существенное влияние фальшборта на величину

гидродинамических сил и моментов: наличие фальшборта приводит к росту опрокидывающего момента почти на 42%.

– Даже при небольшом угле крена опрокидывающие моменты очень большие, что может привести к катастрофе.

Литература

1. Бураковский П.Е. Экспериментальное исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в процессе захвата ее волной // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный выпуск 1. С. 146–152.
2. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография. СПб.: Лань, 2020. 300 с.
3. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Опыт использования технологии SPH для определения внешних сил, действующих на носовую оконечность судна в условиях ее захвата волной. БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ: 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. С. 43–48.
4. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Нечаев Ю.И., Прохнич В.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф // Морской вестник. 2013. №1(45). С.89–95.
5. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее залипании на встречном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42), т. 3. С. 19-25.
6. Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis // The Astronomical J. 1977. № 82. P. 1013–1024.
7. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars // MNRAS. 1977. № 181. P. 375–389.
8. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics. 1992. № 30. P. 543–574.
9. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) // Comput. Phys. Commun. 2015. Vol. 187. P. 204–216.
10. Altomare C., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Gonzalez-Cao J., Suzuki T., Gomez-Gesteira M., Troch P. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. Coast. Eng. 2017. Vol. 127. P 37–54.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость / Российский Морской Регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2018. 82 с.
12. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. Оценка влияния главных размерений судна на гидродинамические моменты, действующие на носовую оконечность в условиях ее захвата волной, с использованием технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации : материалы V нац. науч.- техн. конф. Электрон. дан. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2022. С. 195–200.
13. Пат. 2765518 Российская Федерация, МПК В63В 71/20. Способ определения формы носовой оконечности корпуса судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2021114559; заявл. 21.05.2021; опубл. 31.01.2022, бюл. №4. – 10 с.

References

1. Burakovskiy P.E. (2019). Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' sudna v protsesse zakhvata ee volnoy [Experimental study of hydrodynamic forces acting on the bow tip of the vessel during its capture by a wave]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, special issue 1, pp. 146–152.
2. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Konstruktivnoe obespechenie bezopasnosti moreplavaniya: monografiya [Constructive provision of navigation safety: monograph]. Saint Petersburg, Lan', 2020. 300 p.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Opyt ispol'zovaniya tekhnologii SPH dlya opredeleniya vneshnikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' sudna v usloviyakh ee zakhvata volnoy [Experience in using SPH technology to determine the external forces acting on the bow tip of the vessel in conditions of its capture by a wave]. Baltiyskiy morskoy forum: proceedings of VIII International Baltic Marine Forum 5-10 October 2020: In 6 volumes. Vol. 2. «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoy industrii», VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Kaliningrad: BGARF, 2020, pp. 43–48.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. (2013). Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof [Problems of controlling the dynamics of a ship in extreme situations based on the methods of modern disaster theory]. Morskoy vestnik, №1(45), pp. 89–95.

5. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2018). K voprosu ob opredelenii nagruzki, deystvuyushchey na palubu sudna v nosovoy okonechnosti pri ee zalivanii na vstrechnom volnenii [On the issue of determining the load acting on the deck of the vessel in the bow tip when it is flooded on a counter wave]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(42), Vol. 3, pp. 19–25.
6. Lucy L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astronomical J., № 82, pp. 1013–1024.
7. Gingold R. A., Monaghan J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. MNRAS, № 181, pp. 375–389.
8. Monaghan J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, № 30, pp. 543–574.
9. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. (2015). DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Comput. Phys. Commun., vol. 187, pp. 204–216.
10. Altomare C., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Gonzalez-Cao J., Suzuki T., Gomez-Gesteira M., Troch P. (2017). Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. Coast. Eng., vol. 127, pp. 37–54.
11. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of ships]. Part IV. Stability. Saint Petersburg, Russian register of shipping, 2018. 82 p.
12. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. Ocenka vliyaniya glavnykh razmereniy sudna na gidrodinamicheskie momenty, deystvuyushchie na nosovuyu okonechnost' v usloviyah ee zahvata volnoj, s ispol'zovaniem tekhnologii Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [Evaluation of the influence of the main dimensions of the vessel on the hydrodynamic moments acting on the bow in the conditions of its capture by a wave, using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) technology]. Innovacionnoe razvitie rybnoj otrasli v kontekste obespecheniya prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii : proceedings of V national scientific and technical conference. Vladivostok : Dal'rybvtuz, 2022, pp. 195–200.
13. Patent 2765518 Russian Federation, IPC B63B 71/20. Sposob opredeleniya formy nosovoy okonechnosti korpusa sudna [Method for determining the shape of the bow of the ship's hull]. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Yusyp V.M. № 2021114559; filled 21.05.2021; published 31.01.2022, bulletin №4. 10 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.11.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.060>**Анализ возможности увеличения контейнеровместимости и главных размерений контейнеровозов**И.В. Якута¹ yakuta@bgarf.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Рост контейнерных перевозок, который наблюдается в настоящее время, привел к увеличению строительства контейнеровозов с большой контейнеровместимостью, главным требованием у которых является размещение целого количества контейнеров по ширине, длине и глубине трюмов. В работе проанализированы отношения главных размерений 110 контейнеровозов постройки 2004-2021 годов. Суды были разделены на четыре группы в зависимости от контейнеровместимости. Произведенные расчеты показали, что среднее значение отношения длины судна к ширине L/B изменяется от 6,61 до 7,77 в зависимости от контейнеровместимости. Зависимость ширины контейнеровозов от размеров перевозимых контейнеров влияет на то, что это отношение практически не зависит от размера, скорости или других параметров судна. Среднее значение отношения ширины судна к осадке B/T изменяется от 2,72 до 3,67. Высота борта также меняется дискретным образом и зависит от количества размещаемых в трюмах контейнеров. Среднее значение отношения длины судна к высоте борта L/H колеблется от 11,83 до 13,17, а среднее значение отношения длины судна к осадке L/T изменяется от 18,05 до 24,68. Отношение высоты борта к осадке H/T увеличивается при увеличении контейнеровместимости с 1,53 до 2,03. Рост контейнеровместимости и главных размерений контейнеровозов благоприятно влияют на их мореходные качества. Но ограничения, связанные с размерами морских проливов, каналов, шлюзов, а также глубины на фарватерах и у причалов, не позволяют дальнейшего роста главных размерений этих судов.

Ключевые слова: контейнеровоз, главные размерения, контейнеровместимость, мореходные качества, аварийность, эксплуатационные ограничения, безопасность мореплавания.

Для цитирования Якута И.В. Анализ возможности увеличения контейнеровместимости и главных размерений контейнеровозов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 33—38.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.060>**The Analysis of the possibility to Increase the Container Capacity and Container Ship Principal Dimensions.**Irina V. Yakuta¹ yakuta@bgarf.ru¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The present day growth of the container shipping has lead to the increase in designing and building of high-capacity container-ships taking into account the requirement to stow the whole number of containers in rows, bays and tiers. In the research we analyzed principal dimensions ratios of 110 container-ships built in 2004-2021. The vessels were divided in four groups depending on their capacity. The average value of the length-to-breadth ratio changes L/B from 6,61 to 7,77. The fact that the container-ships' breadth depends on the size of the containers carried makes this ratio practically independent of the size, speed and other parameters. The average value of the breadth-to-draft ratio B/T is from 2,72 to 3,67. The depth also changes discretely and depends on the number of containers stowed in the holds. The average value of the length-to-depth ratio L/H is from 11,83 to 13,17. For the container-ships the average value of the length-to-draft ratio changes L/T from 18,05 to 24,68. The depth-to-draft ratio increases along with the increase in container capacity H/T from 1,53 to 2,03. The growth of container capacity and principal dimensions of the container-ships has a positive impact on their seaworthiness. However the restrictions connected with the sizes of sea straits, canals, locks as well as depths in the fairway and at berths do not allow the further growth of the ship principal dimensions.

Key words: container ship, main dimensions, container capacity, seaworthiness, accident rate, operational restrictions, safety of navigation.

For citation: Irina V. Yakuta, Analysis of the possibility of increasing container capacity and main dimensions of container ships, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 33—38.

Введение

После выхода мировой экономики из глобальной изоляции после пандемии начал расти спрос на морские контейнерные перевозки, что способствовало увеличению на верфях новых заказов на крупные современные контейнеровозы

[1]. В 2021 году доля контрактов на постройку этого типа судов превысила 50%-ный показатель. В этом году на верфях мира было размещено заказов на постройку более 550 контейнеровозов, то есть в 2,5 раза больше, чем за два предшествующих года, вместе взятых, что стало определенным рекордом. К настоящему времени с учетом ранее заключенных

контрактов, на различных этапах строительства находятся контейнеровозы на 5,7 млн. TEU (двадцатифутовый эквивалент, единица измерения вместимости контейнеровозов), что составляет 23% всей вместимости действующего контейнерного флота [2]. Таким образом, к 2025 году совокупная вместимость мирового контейнерного флота превысит предшествовавший началу пандемии уровень на 30% [3].

Стоимость постройки контейнеровозов также увеличилась в среднем на 30%, в результате чего к началу 2022 года средняя стоимость строительства контейнеровоза вместимостью 22-24 тыс. TEU достигла 200,5 млн. долларов. Средняя стоимость постройки контейнеровоза увеличилась на 23 млн. долларов [1,2].

В конце прошлого века начался стремительный рост вместимости контейнеровозов, что вызвало резкое увеличение строительства крупнотоннажных контейнеровозов. В 1997 году появились контейнеровозы вместимостью до 6000 TEU, в 1999 году – вместимостью 8300 TEU, в 2007 году – вместимостью 12500 TEU, а в 2022 году – 24000 TEU. В период с 1968 по 2018 год вместимость контейнеровозов выросла на 1200% [4]. С момента постройки первого контейнеровоза контейнеровместимость увеличилась в 60 раз: с 400 до 24000 TEU.

В 2022 году в эксплуатацию был сдан самый большой в мире контейнеровоз «Ever Aot». Длина судна составляет 399,99 м, ширина – 61,5 м, площадь палубы – 24 тыс. кв. м, вместимость – 24004 TEU. Это первый контейнеровоз, который превзошел рекорд в 24000 TEU, а также стал крупнейшим в мире контейнеровозом с точки зрения номинального объема приема контейнеров. При проектировании этого судна были использованы новейшие технологии гидродинамической оптимизации, которые позволяют таким контейнеровозам перевозить тяжелые грузы на высокой скорости с низким расходом топлива. Всего в 2022 году на воду будет спущено 12 таких гигантов [5].

Зависимость отношения главных размеров контейнеровозов от увеличения их контейнеровместимости

Основной эксплуатационно-технической характеристикой контейнеровозов является контейнеровместимость, которая во всех странах определяется в 20-футовом исчислении (TEU). При проектировании контейнеровозов и выборе их главных размеров учитываются требования по размещению целого количества контейнеров по глубине трюмов, ширине, длине. Поэтому ширина и высота борта являются дискретными величинами, зависящими от габаритов перевозимых контейнеров. Длина контейнеровозов зависит от скорости хода и необходимой контейнеровместимости [6-8].

В статье выполнен анализ изменения отношений главных размеров и контейнеровместимости 110 контейнеровозов постройки 2004-2021 годов и построены графики зависимости отношений главных размеров контейнеровозов от их контейнеровместимости (рис.1–5).

Суда были разделены на четыре группы в зависимости от контейнеровместимости. Первая группа контейнеровозов имеет вместимость 700-

4000 TEU, вторая – 4000-11000 TEU, третья – 11000-16000 TEU, четвертая – 16000-24000 TEU.

Отношение длины судна к ширине L/B определяет скоростные качества судна, его остойчивость и маневренность, чем больше это отношение, тем быстрее судно, но происходит снижение остойчивости [7].

На рис.1 показана зависимость отношения длины судна к ширине L/B от контейнеровместимости.

Для контейнеровозов первой группы среднее значение отношения L/B равно 6,61, для второй группы – 7,77, для третьей группы – 7,44, для четвертой группы судов – 6,72.

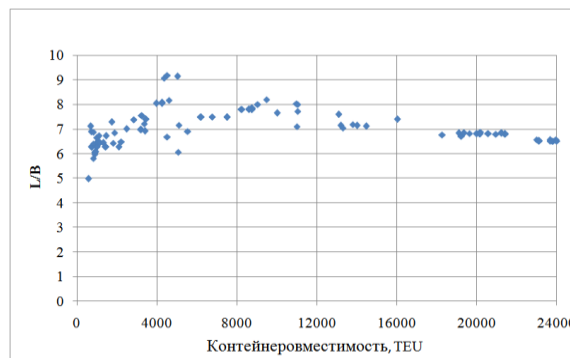


Рис.1 Зависимость отношения длины к ширине судна от контейнеровместимости

Скоростные качества контейнеровозов улучшаются в связи с тем, что главной составляющей сопротивления движению судна становится сопротивление трения, зависящее от величины смоченной поверхности, а она уменьшается с уменьшением отношения L/B .

Анализ графической зависимости L/B показывает, что данный показатель имеет наибольшее значение 9,0 у судов с контейнеровместимостью от 4000-6000 TEU, при увеличении контейнеровместимости до 24000 TEU это отношение уменьшается и составляет 6,50.

Как указывалось в работе [6], для контейнеровозов отношение L/B может приниматься в пределах от 6,5 до 8,0 практически независимо от размера, скорости и других параметров судна. Этот принцип так и остался, несмотря на то, что за последние 12 лет контейнеровместимость увеличилась на 10000 TEU.

Отношение ширины к осадке B/T определяет поперечную остойчивость, сопротивление движению судна и качку. Суда с небольшим отношением B/T имеют меньшую начальную остойчивость, чем суда с большим B/T , хотя последние имеют порывистую качку на волнении. С увеличением этого отношения увеличивается сопротивление движению, у судов с большим B/T оно больше, чем у судов с малым B/T [6-8].

На рис.2 представлена зависимость отношения ширины судна к осадке B/T от контейнеровместимости.

Для контейнеровозов первой группы среднее значение отношения B/T равно 2,72, второй группы – 2,74, третьей – 3,22, четвертой – 3,67.

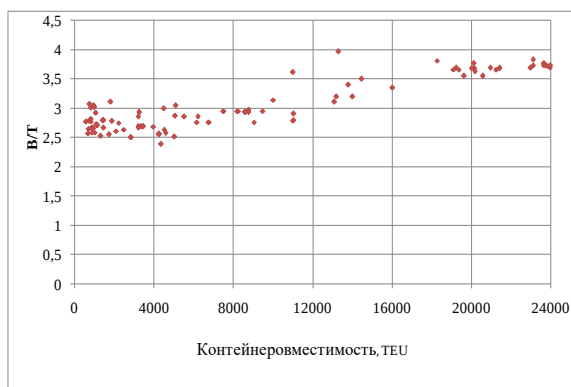


Рис.2 Зависимость отношения ширины к осадке судна от контейнеровместимости

Увеличение отношения B/T при увеличении контейнеровместимости, говорит о хорошей остойчивости контейнеровозов, но у слишком широких судов возникают проблемы при выгрузке.

Как уже говорилось выше, при выборе размерений контейнеровозов учитываются требования размещения целого количества контейнеров по ширине судна. Это приводит к тому, что при одной и той же ширине судна контейнеровозы имеют разную вместимость [6]. Увеличение контейнеровместимости при постоянной ширине достигается ростом длины судна и размещением большого количества контейнеров на верхней палубе, что существенно влияет на остойчивость. Для обеспечения достаточной остойчивости можно увеличить ширину судна при одновременном сокращении длины, но с сохранением необходимой контейнеровместимости.

Отношение длины судна к высоте борта L/H влияет на прочность корпуса. Чем выше это отношение, тем сложнее обеспечить общую продольную прочность судна [7].

На рис.3 показана зависимость отношения длины судна к высоте борта L/H в зависимости от контейнеровместимости.

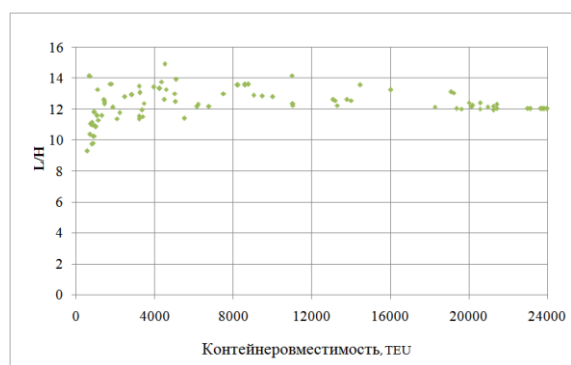


Рис.3 Зависимость отношения длины к высоте борта судна от контейнеровместимости

Высота борта также меняется дискретным образом и зависит от количества размещаемых в трюмах контейнеров [6].

Для контейнеровозов первой группы среднее значение отношения L/H равно 11,83, второй группы

– 13,17, третьей – 12,72, четвертой – 12,15.

Проведенные расчеты показали, что отношение L/H снижается с увеличением контейнеровместимости, что говорит о том, что обеспечить общую продольную прочность судна стало легче.

Отношение длины судна к осадке L/T влияет на управляемость. Увеличение этого отношения повышает устойчивость на курсе, но ухудшает поворотливость.

На рис.4 представлена зависимость отношения длины судна к осадке L/T от контейнеровместимости.

Для контейнеровозов первой группы среднее значение отношения L/T равно 18,05, второй группы – 21,97, третьей – 23,84, четвертой – 24,68.

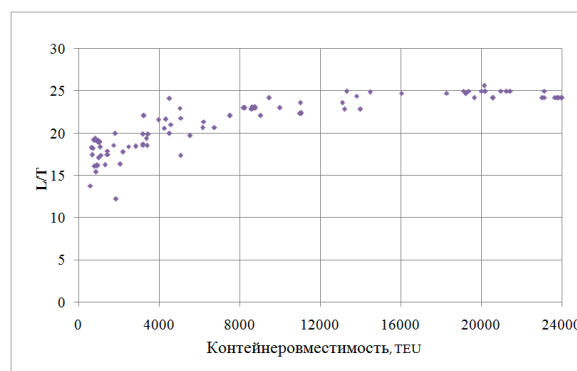


Рис.4 Зависимость отношения длины к осадке судна от контейнеровместимости

Произведенные расчеты показывают, что отношения L/T увеличивается с увеличением контейнеровместимости, что говорит о хорошей устойчивости контейнеровозов на курсе, однако при этом ухудшается поворотливость. Чувствительность к изменению курса лучше у судов с меньшим отношением, поэтому крупные контейнеровозы ограничены в маневренности при стесненных условиях плавания.

Отношение высоты борта к осадке H/T характеризует запас водоизмещения и определяет остойчивость на больших углах крена. Рост H/T благоприятно влияет на эти качества. Чем больше отношение H/T , тем больше надводный борт и, следовательно, запас плавучести судна. Судна с большим H/T обладают лучшей остойчивостью, чем суда с малым H/T [7].

На рис.5 представлена зависимость отношения высоты борта к осадке H/T от контейнеровместимости.

Для контейнеровозов первой группы среднее значение отношения H/T равно 1,53, второй группы – 1,67, третьей – 1,88, четвертой – 2,03.

Это позволяет констатировать, что с увеличением контейнеровместимости остойчивость улучшается и это оправдывает стремление увеличивать высоту борта и осадку.

Так как при проектировании контейнеровозов высота борта и ширина судна имеют дискретный характер, то это не позволяет получить корректные зависимости отношений L/B , B/T и L/H от контейнеровместимости [6].

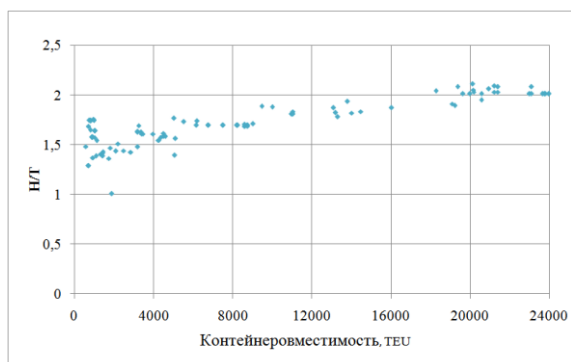


Рис.5 Зависимость отношения высоты борта к осадке судна от контейнеровместимости

В связи с ограничением, связанным с шириной Панамского канала, рост отношения длины судна к ширине для крупнотоннажных контейнеровозов для увеличения их вместимости, возможен только за счет увеличения длины судна.

Обеспечение достаточной остойчивости при перевозке значительной части контейнеров на верхней палубе требует увеличения значений отношения ширины судна к осадке.

Отношения высоты борта к осадке и длины судна к осадке при увеличении контейнеровместимости изменяются незначительно и обладают относительной стабильностью.

Возникает вопрос: возможно ли дальнейшее увеличение контейнеровместимости и главных размерений контейнеровозов? Уже сегодня специалисты констатируют тот факт, что очень большому судну комфортно в открытом море, но как только оно оказывается в стесненных условиях, как его размеры становятся проблемой [8-11].

Имеющиеся ограничения по приему крупных контейнеровозов в портах, а также эксплуатационные ограничения, связанные с глубинами на основных маршрутах, размеры проливов, каналов, высота мостов являются барьерами на пути дальнейшего увеличения контейнеровместимости.

В настоящее время не все порты могут принимать современные крупнотоннажные суда. Развитие портов не успевает за увеличением размеров судов и объемов мировой торговли. Например, порт Гонконг имеет мост через гавань, высота которого над уровнем воды около 70 м, поэтому он может принимать контейнеровозы вместимостью не более 14000 TEU. Из-за ограниченной глубины Малаккского пролива, очень большие контейнеровозы не могут иметь осадку более 21 м [7,9].

В январе 2022 года в порту Гамбург завершен комплекс работ по дноуглублению и расширению судового хода. Если до проведения дноуглубительных работ порт Гамбург мог принимать суда с максимальной осадкой до 11,3 м, то теперь этот показатель вырос до 15,4 м. В настоящее время у причальных стенок контейнерного терминала могут швартоваться контейнеровозы с длиной корпуса до 400 м, осадкой до 13,4 м и шириной до 62,5 м.

Суэцкий канал пересекают несколько мостов, поэтому по нему могут пройти суда, которые возвышаются над поверхностью воды не более чем на 68 метров, осадкой не более 20 метров,

дедвейтом до 240000 тонн, шириной не больше 77,5 метра. Сейчас ведутся работы по расширению и углублению Суэцкого канала, их завершение ожидается к июлю 2023 года, после этого пропускная способность канала увеличится на 28%.

Панамский канал имеет тоже свои ограничения, которые назначены существующими глубинами, шириной шлюзов, а также высотой мостов. Ширина шлюзов Панамского канала равна 33,53 м, длина – 304,8 м, минимальная глубина – 12,55 м. Администрацией канала установлены проходные размеры для судов, длина которых не должна превышать 294,1 м, ширина – 32,3 м, осадка – 12 м, высота – 57,91 м [9].

С повышением контейнеровместимости и размеров судов растёт и вероятность возникновения аварий.

Для контейнеровозов свойственны все риски, которые характерны для судоходной отрасли: столкновения, посадки на мель, пожары, выход из строя оборудования и механизмов, воздействия гидрометеорологических факторов, акты внешней агрессии и т.д. В тоже время для них присущи и свои уникальные риски, обусловленные особенностями перевозимых грузов, технологией перевозок и проведения погрузочно-разгрузочных работ [10].

Целесообразность гигантских размеров контейнеровозов неоднократно подвергалась сомнениям, но особенно остро встал этот вопрос после инцидента в Суэцком канале. Слишком большие суда ставят под угрозу безопасность мореплавания.

24 марта 2021 года контейнеровоз «Ever Given», длиной 400 м при движении по Суэцкому каналу был развёрнут, причиной стал сильный боковой ветер. Носовая и кормовая части судна погрузились в левый и правый берега канала и заблокировали судно. В результате аварии движение по каналу было остановлено. По информации на 26 марта 2021 года, в очереди на прохождение через канал собралось более 150 других судов [11,12].

Шесть дней аварийно-спасательных работ стоили мировой экономике 9,6 млрд. долларов в день и создали беспрецедентную пробку в истории судоходства, 450 судов ждали прохода по каналу. Чтобы снять с мели контейнеровоз «Ever Given», власти Суэцкого канала использовали 14 буксиров, экскаваторы, дноуглубительное судно и подъемный кран. Ущерб от блокировки Суэцкого канала составлял 400 млн. долларов в час. Общий ущерб оценивается в 41,4 млрд. долларов [12].

Это не первая крупная авария этого судна-гиганта. В 2019 году контейнеровоз «Ever Given» в порту Гамбурга, протаранил паром «Hadam-Fähre» и повредил причал, из-за чего судоходство по Эльбе в районе Гамбурга было полностью остановлено.

В конце 2020 года в мировом портфеле заказов размещались в основном заказы на контейнеровозы максимальной вместимости – 23000-24000 TEU. Из 23 заказанных судов только четыре имели меньшую вместимость. В 2021 году из заказанных 81 контейнеровоза, вместимость которых начинается от 11800 TEU, только четыре судна были больше 15500 TEU. Крупные контейнеровозы у перевозчиков стали менее популярны, чем 15- и 16-тысячники. Это связано с тем, что такие суда обеспечивают значительную экономию за счет большого масштаба

перевозимых контейнеров, но при этом не ограничивают оператора в выборе маршрута, как 20-тысячники [13].

Заключение

Проведенный анализ зависимости отношений главных размерений современных контейнеровозов от их контейнеровместимости показал, что, несмотря на значительное увеличение размеров этих судов в последние годы, отношение главных размерений изменяется незначительно. Показано оптимальное нахождение этих отношений в определенных диапазонах с одними значениями, характерными для

малых судов, и другими значениями, характерными для контейнеровозов с большой контейнеровместимостью.

Однако сегодня приходится еще раз говорить о том, что видимо, размеры контейнеровозов достигли своих максимальных значений. Условия эксплуатации накладывают ограничения на рост главных размерений этих судов и, кроме того, контейнеровозы с большой контейнеровместимостью представляют определенную угрозу безопасности мореплавания.

Литература

1. Сидоров А. Мировой рынок: тенденции и ожидания //Морские вести России. 2022. №7. URL: <http://www.morvesti.ru/obzor> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Новые контейнеровозы: сколько строят и сколько стоят. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/novye_konteynerovozy_skolko_stroyat_i_skolko_stoyat.html (дата обращения: 15.09.2022).
3. Глобальный контейнерный флот в 2025 превысит допандемический уровень на 30%. URL: <https://infranews.ru/logistika/more/60354-globalnyj-kontejnornyj-flot-v-2025-prevysit-dopandemicheskij-uroven-na-30/> (дата обращения: 16.09.2022).
4. Мотрич В. Проблемы ультрабольших контейнеровозов. // Морской флот: электронный журнал. 2016. №6. с.22-28. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1689/64693/> (дата обращения: 14.06.2022).
5. Топ-10 самых крупных контейнеровозов в 2022 году. URL: <https://moverdb.com/ru/top-10-largest-container-ships-in-2022/> (дата обращения: 23.08.2022).
6. Логачев С.И., Чугунов В.В., Горин Е.А. Мировое судостроение современное состояние и перспективы развития. СПб., изд. Мор Вест, 2009, 538 с.
7. Бородавин Д.И. Проектное обоснование технических и экономических характеристик контейнерных и накатных судов: дис. канд. техн. наук: 05.08.03. Санкт-Петербург, 2012. 244 с. URL: <http://www.dslib.net/proekt-sudov/proektnoe-obosnovanie-tehnicheskikh-i-ekonomicheskikh-harakteristik-kontejneryh-i.html> (дата обращения: 15.06.2022).
8. Соотношения главных размерений. URL: <https://www.seaships.ru/correlations.htm> (дата обращения: 16.09.2022).
9. Морские монстры: самые большие торговые суда, которые можно встретить в море. URL: <https://vk.com/@rostrism-morskie-monstry-samye-bolshie-torgovye-suda-kotorye-mozhno-v> (дата обращения: 12.06.2022).
10. Аварии с контейнерами. URL: <https://news.ati.su/article/2016/01/25/avarii-s-kontejnerami-651531/> (дата обращения: 02.06.2022).
11. Главные морские происшествия 2021 года. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/glavnye-morskie-proisshestvija-2021-goda>. (дата обращения: 23.05.2022).
12. Авария контейнеровоза «Эвер Гивен». URL: <https://ru.wikipedia.org/>. (дата обращения: 23.05.2022).
13. Объем судостроительных заказов вырос вдвое. URL: <https://seanews.ru/2021/05/31/ru-obem-sudostroitelnyh-zakazov-vyros-vdvoe/>. (дата обращения: 28.06.2022).

References

1. Sidorov A. Mirovoj rynok: tendencii i ozhidaniya. [Global Market: Trends and Expectations]. Morskie vesti Rossii, 2022, no. 7. Available at: <http://www.morvesti.ru/obzor/1715/96626/> (Accessed 10 September 2022).
2. Novye kontejnerovozy: skol'ko stroyat i skol'ko stoyat. [New container ships: how much they build and how much they cost.]. Available at: https://www.korabel.ru/news/comments/novye_konteynerovozy_skolko_stroyat_i_skolko_stoyat.html (Accessed 15 September 2022).
3. Global'nyj kontejnornyj flot v 2025 prevysit dopandemicheskij uroven' na 30%. [The global container fleet in 2025 will exceed the pre-pandemic level by 30%]. Available at: <https://infranews.ru/logistika/more/60354-globalnyj-kontejnornyj-flot-v-2025-prevysit-dopandemicheskij-uroven-na-30/> (Accessed 16 September 2022).
4. Motrich V. Problemy ul'trabort'shikh konteynerovozov. [Problems of ultra-large container ships]. Morskoy flot, 2016. no.6. s.22-28 Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1689/64693/> (Accessed 14 June 2022).
5. Top-10 samyh krupnyh kontejnerovozov v 2022 godu. [Top 10 largest container ships in 2022]. Available at: <https://moverdb.com/ru/top-10-largest-container-ships-in-2022/>. (Accessed 23 August 2022).
6. Logachev S.I., Chugunov V.V., Gorin E.A. Mirovoe sudostroenie sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [World shipbuilding current state and development prospects]. Saint-Petersburg, izd.Mor Vest, 2009. 538 p.
7. Borodavin D.I. Proektnoe obosnovanie tekhnicheskikh i ekonomicheskikh kharakteristik konteyneryh i nakatnykh sudov. Diss. kand. tekhn. nauk [Design justification of the technical and economic characteristics of container and ro-ro ships. Dis. cand. techn. sci.]. Saint-Petersburg, 2012. 244 s. Available at: <http://www.dslib.net/proekt-sudov/proektnoe-obosnovanie-tehnicheskikh-i-ekonomicheskikh-harakteristik-kontejneryh-i.html> (Accessed 15 June 2022).
8. Sootnosheniya glavnyh razmerenij. [Relationships of the main dimensions.]. Available at: <https://www.seaships.ru/correlations.htm>. (Accessed 16 September 2022).

9. Morskie monstry: samye bol'shie trgovye suda, kotorye mozjno vstretit' v more. [Sea monsters: The largest merchant ships that can be found at sea]. Available at: <https://vk.com/@rosturism-morskie-monstry-samye-bolshie-torgovye-suda-kotorye-mozhno-v> (Accessed 12 June 2022).
10. Avarii s konteynerami [Container accidents]. Available at: <https://news.ati.su/article/2016/01/25/avarii-s-konteynerami-651531/> (Accessed 2 June 2022).
11. Glavnye morskije proisshestviya 2021 goda [Top maritime incidents of 2021]. Available at: <https://maritime-zone.com/news/view/glavnye-morskije-proisshestviya-2021-goda> (Accessed 23 May 2022).
12. Avariya konteynerovoza «Ever Given». [The accident of the container ship "Ever Given"]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/> (Accessed 23 May 2022).
13. Ob'em sudostroitel'nyh zakazov vyros vdvoe. [The volume of shipbuilding orders doubled]. Available at: <https://seanews.ru/2021/05/31/ru-obem-sudostroitelnyh-zakazov-vyros-vdvoe/>. (Accessed 28 June 2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ирина Владимировна Якута, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: yakuta@bgarf.ru

Irina V. Yakuta, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of navigation and safety of navigation, Baltic fishing fleet state academy, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: yakuta@bgarf.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 532.582.4+629.5.015

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.061>

Исследование влияния конструктивных элементов на гидродинамические силы и моменты, действующие на носовую оконечность судна в условиях её зарываемости, с использованием технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

П.Е. Бураковский¹ paul_b@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация Повышение безопасности судов в штормовых условиях при наличии зарываемости носовой оконечности, когда может произойти её захват волной, сопряжено с необходимостью определения гидродинамических сил и моментов, возникающих в носовой оконечности судна и оценки влияния на их величину конструктивных элементов носовой части судна, в частности, фальшборта. В настоящей работе для исследования динамики взаимодействия носовой оконечности судна с внешней средой использовался метод SPH. Выполнена оценка гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность в направлении обтекания и в поперечном направлении, показавшая, что их величина может быть весьма существенной и представлять опасность с точки зрения обеспечения безопасности мореплавания. Исследовано изменение гидродинамических сил и моментов, действующих на носовую оконечность, в зависимости от угла крена судна а также геометрических характеристик фальшборта. Показано существенное влияние главных размерений и условий загрузки судна, а также фальшборта и его характеристик, на величину гидродинамических сил и кренящих моментов, действующих на носовую оконечность судна в условиях ее зарываемости в волну.

Ключевые слова: зарываемость в волну, гидродинамическая сила, кренящий момент, встречное волнение, главные размерения, фальшборт, угол крена, развал фальшборта, SPH.

Для цитирования: Бураковский П.Е. Исследование влияния конструктивных элементов на гидродинамические силы и моменты, действующие на носовую оконечность судна в условиях ее зарываемости, с использованием технологии Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 39—45.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.061>

Investigation of the influence of structural elements on the hydrodynamic forces and moments acting on the bow of the ship in conditions of its burrowing using technology Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Pavel E. Burakovskiy¹ paul_b@mail.ru¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Improving the safety of ships in stormy conditions in the presence of burrowing of the bow, when it can be captured by a wave, is associated with the need to determine the hydrodynamic forces and moments that arise in the bow of the ship and assess the impact on their magnitude of the structural elements of the bow of the ship, in particular, the bulwark. In this work, the SPH method was used to study the dynamics of the interaction of the bow of the ship with the external environment. An assessment of the hydrodynamic forces acting on the bow in the flow direction and in the transverse direction has been carried out, showing that their magnitude can be very significant and pose a danger from the point of view of ensuring the safety of navigation. The change in hydrodynamic forces and moments acting on the bow is investigated, depending on the roll angle of the vessel and the geometric characteristics of the bulwark. A significant influence of the main dimensions and loading conditions of the vessel, as well as the bulwark and its characteristics, on the magnitude of hydrodynamic forces and heeling moments acting on the bow end of the vessel in the conditions of its burrowing into a wave.

Key words: burrowing into a wave, hydrodynamic force, heeling moment, oncoming waves, main dimensions, bulwarks, bank angle, bulwark camber, SPH.

For citation: Pavel E. Burakovskiy, Investigation of the influence of structural elements on the hydrodynamic forces and moments acting on the bow of the ship in conditions of its burrowing using technology Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 39—45.

Введение

Для повышения безопасности мореплавания в условиях зарываемости носовой оконечности, когда может произойти её захват волной, необходимо иметь представление о гидродинамических силах и

гидродинамических моментах, возникающих в носовой оконечности судна. Эти вопросы уже поднимались авторами в [1, 2, 3, 4], однако в полной мере этот вопрос еще далек от своего решения. В частности, не ясно, как будет влиять на гидродинамические силы развал фальшборта, а также соотношение главных размерений, а именно

отношение ширины судна к высоте его борта B/H в носовой оконечности и условий его загрузки.

1. Методы исследований

Решение задачи будет осуществляться в рамках метода SPH на модели носовой оконечности судна, схема обтекания которой представлена на рис. 1, где H – высота борта; B – ширина палубы судна; v – скорость обтекания; β – угол развала фальшборта. Метод SPH, относящийся к бессеточным методам, в соответствии с которым жидкость моделировалась путем деления на дискретные элементы (частицы) [5, 6, 7]. Исследование процесса обтекания носовой оконечности потоком жидкости осуществлялось с использованием пакета DualSPHysics [8, 9], при этом моделировалась прямоугольная камера с потоком жидкости, в которой размещалась трёхмерная модель носовой оконечности, один из вариантов конструктивного исполнения которой представлен на рис. 2. Построение модели осуществлялось на основании теоретического чертежа судна при помощи программы программного пакета для 3D-моделирования.

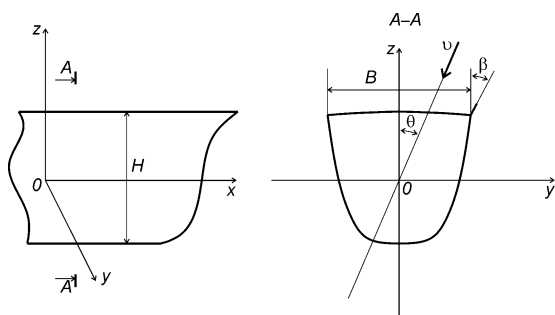


Рис. 1. Схема обтекания модели носовой оконечности

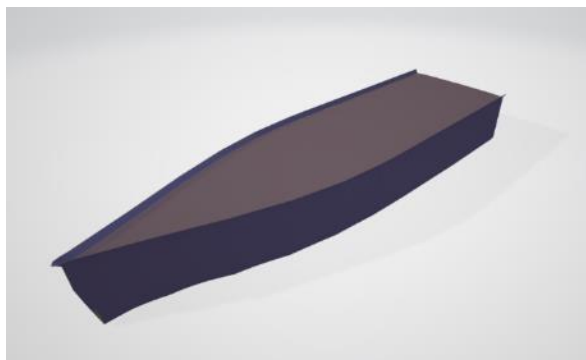


Рис. 2. Модель носовой оконечности с фальшбортом

В процессе испытаний модель носовой оконечности устанавливалась в лотке неподвижно, где на неё набегал поток жидкости. Такая схема осуществления вычислительного эксперимента аналогична помещению модели носовой оконечности в рабочую часть гидрлотка в случае проведения физического эксперимента. В процессе испытаний задавалась различная скорость движения жидкости, при этом определялись все представляющие интерес компоненты гидродинамических усилий, о чем более подробно сказано ниже. Общий вид испытательной установки с установленной в ней моделью носовой оконечности судна представлен на рис. 3.

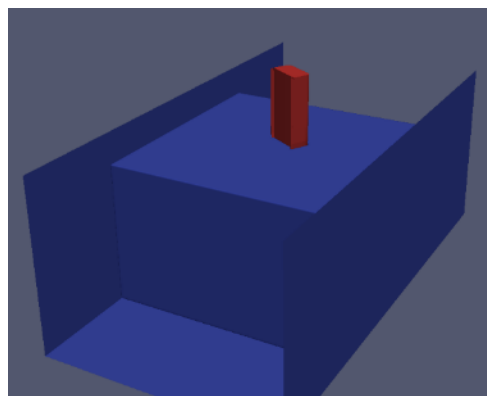


Рис. 3. Общий вид установки для испытания моделей

С целью исследования закономерностей изменения гидродинамических характеристик носовой оконечности при различных углах крена θ , в процессе вычислительного эксперимента модель носовой оконечности поворачивалась вокруг оси Ox , проходящей через центр тяжести модели. При этом варьировалось отношение главных размерений B/H , условия загрузки судна путем смещения центра тяжести модели, а также угол развала фальшборта β относительно диаметральной плоскости и его высота. Испытания проводились при скорости обтекания $v=0,5$ м/с, что является характерным для зарывания носовой оконечности в волну с учетом масштаба модели 1:100, при этом моделировалось погружение в воду части корпуса длиной $L/4$, где L – длина судна. На рис. 4 представлена испытываемая модель, обтекаемая моделируемой жидкостью, при развороте модели на угол $\theta=60^\circ$.

В процессе эксперимента при фиксированных углах θ и β определялись усилия, действующие на модель в направлении ее обтекания C_{zz}^θ , усилия, действующие в перпендикулярном направлении C_{yz}^θ и опрокидывающий момент $\bar{m}_{zy}$. Для удобства анализа результатов расчета все искомые величины представлены в безразмерном виде:

$$C_{zz}^\theta = \frac{R_{zz}^\theta}{R_{zz}^0}, \quad (1)$$

$$C_{yz}^\theta = \frac{R_{yz}^\theta}{R_{zz}^0}, \quad (2)$$

$$\bar{m}_{zy} = \frac{M_{zy}}{M_{\max M}}, \quad (3)$$

где R_{zz}^θ – сила, действующая на модель в направлении обтекания при ее развороте на угол θ ;

R_{zz}^0 – сила, действующая на модель в направлении обтекания при $\theta=0$;

R_{yz}^θ – сила, действующая на модель в направлении, перпендикулярном направлению обтекания, при развороте модели на угол θ ;

M_{zy} – гидродинамический момент;

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

определяемый согласно [10].

Правилами Регистра [10] в числе общих требований к остойчивости морских судов установлен ряд условий, которым должна отвечать диаграмма статической остойчивости. В частности,

нормируется площадь под положительной частью диаграммы и максимальное плечо диаграммы статической остойчивости $I_{\max}$ согласно пункту 2.2.1 [10].

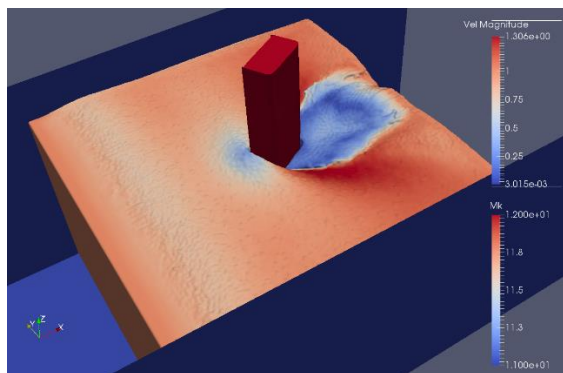


Рис. 4. Модель носовой оконечности в процессе испытаний

Для судна длиной $L=168$ м и водоизмещением $D=27000$ т плечо статической остойчивости $I_{\max}$, можно определить из условия

$$\frac{M_{\max}}{D \cdot g} = I_{\max}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения.

С учетом масштаба модели (1:100) максимальный восстанавливающий момент для нее $M_{\max M}$ при удовлетворении требований [10] составит

$$M_{\max M} = I_{\max M} \cdot D_M \cdot g, \quad (5)$$

где $I_{\max M}$ – максимальное плечо диаграммы статической остойчивости модели при удовлетворении требований [10];
 D_M – водоизмещение модели.

2. Результаты и их обсуждение

Результаты исследования представлены на рис. 5 – рис. 12.

Так, на рис. 5 представлен график изменения гидродинамических моментов, возникающих на носовой оконечности корпуса судна без фальшборта в условиях её зарываемости в волну и возникновения опасности захвата волной [11] в зависимости от соотношений главных размерений судна B/H при вариации угла крена θ . При построении графика учитывалось то обстоятельство, что гидродинамические моменты, увеличивающие угол крена, будут считаться кренящими, а действующие в противоположном направлении – восстанавливающими. При этом в процессе эксперимента отсчёт положительных углов осуществлялся по часовой стрелке. Из графика видно, что соотношение главных размерений B/H существенно влияет на величину и знак гидродинамических моментов. Так, при отношении $B/H=1$ возникают гидродинамические моменты, стремящиеся опрокинуть судно, а при $B/H=2$ гидродинамический момент сначала стремится выпрямить крен, достигая максимальной величины $\bar{m}_{zy \max} \approx 0,1$ при $\theta \approx 40^\circ$, затем уменьшается и при $\theta > 65^\circ$ уходит в отрицательную зону, т.е. становится опрокидывающим. При $B/H=1,66$ наблюдается

аналогичная тенденция, только $\bar{m}_{zy \max} \approx 0,04$ при $\theta \approx 20^\circ$, а затем при $\theta > 35^\circ$ момент становится опрокидывающим.

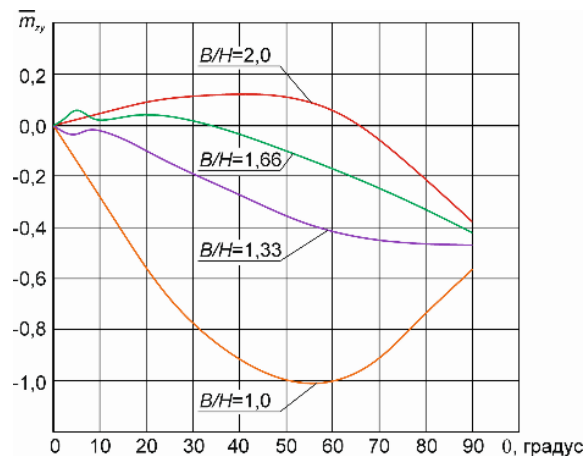


Рис. 5. Изменение гидродинамических моментов на корпусе при вариации отношения главных размерений B/H

На рис. 6 представлен график изменения вертикальных усилий, действующих на носовую оконечность корпуса судна в зависимости от его крена при вариации отношения B/H . Видно, что при $B/H=2$ вертикальные усилия в зависимости от угла крена θ сначала падают примерно на 20%, а затем незначительно возрастают.

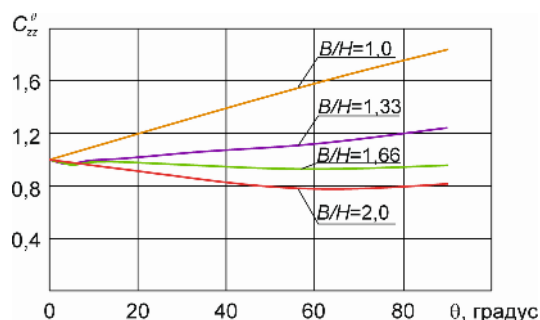


Рис. 6. Изменение вертикальных усилий, действующих на корпус, в условиях зарываемости его носовой оконечности в волну

При $B/H=1,66$ наблюдается та же тенденция, только уровень падения составляет чуть меньше 10%. На остальных корпусах наблюдается монотонное возрастание вертикального давления вплоть до угла крена $\theta=90^\circ$. Так, при $B/H=1,33$ этот рост составляет около 25%, а при $B/H=2$ – 85%. Представленные закономерности определяются, главным образом, наличием плоскостей различной площади палубных и бортовых перекрытий. Анализ результатов показывает, что с уменьшением соотношения B/H уровень вертикальных давлений растёт.

На рис. 7 представлены закономерности изменения усилий, действующих на носовую оконечность корпуса судна перпендикулярно направлению его движения в условиях зарываемости носовой оконечности в волну в зависимости от угла крена судна. Следует отметить, что наблюдаются довольно сложные закономерности изменения

поперечных усилий, ответственных за разворот корпуса судна.

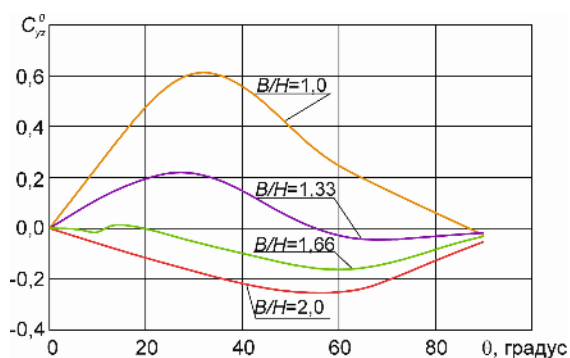


Рис. 7. Изменение усилий, действующих на носовую оконечность корпуса судна, перпендикулярно направлению его движения

Так, для судна с отношением $B/H=2$ эти усилия действуют в отрицательной области с экстремумом при $\theta=55^\circ$. При отношении $B/H=1$ поперечное давление меняет знак и находится в положительной области во всём диапазоне изменения углов крена θ . Для оставшихся двух корпусов с $B/H=1,66$ и $B/H=1,33$ характер изменения поперечных усилий носит совершенно иной характер, чем для корпуса с $B/H=1$ и $B/H=2$. Так, для корпуса с $B/H=1,66$ поперечная сила сначала положительная, а затем меняет знак и уходит в отрицательную область. При $B/H=1,33$ эта закономерность выражена более чётко: эпюра давлений сначала положительна, достигает экстремума при $\theta \approx 25^\circ$, а затем давления снижаются, уходя при $\theta=55^\circ$ в отрицательную область, где достигают экстремум при $\theta \approx 70^\circ$. Такая закономерность обусловлена поворотом плоскостей обтекания палубы и борта.

Эти значения гидродинамических моментов получены для случая нахождения центра тяжести судна при $z_g=H/2$. Для случая полной загрузки судна и судна порожнем положение центра тяжести будет смещаться, при этом, очевидно, моменты гидродинамических сил также будут изменяться. Характер этих изменений представлен на рис. 8. Здесь условно полагается, что случаю судна порожнем соответствует $z_g=H/4$, а для случая судна в полном грузу $z_g=3H/4$. Естественно, для реальных судов аппликаты центра тяжести будут иметь вполне конкретные значения, несколько отличные от принятых в настоящем эксперименте.

Из графиков на рис. 8 видно, что при полной загрузке судна ($z_g=3H/4$) гидродинамический момент для корпуса с $B/H=1$ становится положительным, т.е. восстанавливающим, в то время как в исходном варианте при $z_g=H/2$ (рис. 7) он был отрицательным. Для случая загрузки «судно порожнем» ($z_g=H/4$) величина опрокидывающего момента резко увеличивается, достигая $\bar{m}_{zy \max} = 4$ (для $z_g=H/2$ он составлял $\bar{m}_{zy \max} = 1$), т.е. наблюдается увеличение в 4 раза.

Отсюда видно, что для оценки величины гидродинамических моментов, действующих на носовую оконечность судна в условиях её зарываемости, важно знать условия загрузки судна, т.е. величину z_g для судна. Как будет показано ниже, это же обстоятельство существенным образом

влияет и на гидродинамические моменты, создаваемые фальшбортом и другими конструктивными элементами, расположенными на палубе судна.

Так, на рис. 9 представлен график изменения гидродинамической силы, действующей на модель носовой оконечности судна при её обтекании в направлении оси Oz , с учетом варьирования угла крена судна θ и угла завала фальшборта β при $B/H=2$.

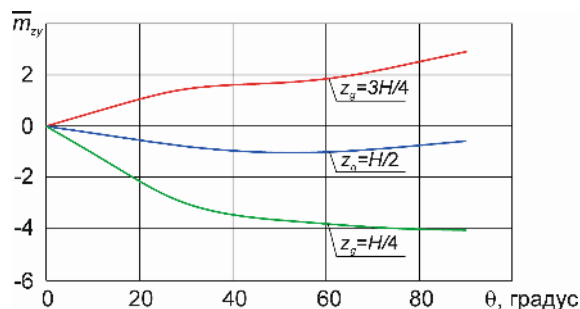


Рис. 8. Изменение гидродинамических моментов, возникающих на корпусе судна в зависимости от условий загрузки для $B/H=1$

Кривая 1 показывает изменение гидродинамической силы, действующей на носовую оконечность судна при различных углах крена θ при отсутствии фальшборта. Видно, что суммарное давление монотонно падает при увеличении крена до $\theta=60^\circ$, после чего наблюдается незначительный рост за счет включения в процесс обтекания бортового перекрытия. Положение экстремума кривой 1 определяется соотношением ширины палубы и высоты надводного борта в носовой части судна.

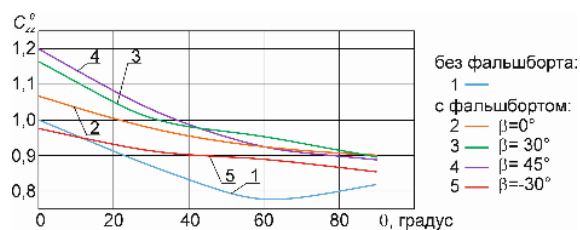


Рис. 9. Усилие, действующее на носовую оконечность в направлении обтекания ($B/H=2$)

Кривые 2-5 показывают степень влияния фальшборта на изменение гидродинамической силы в направлении оси Oz (суммарное давление C_{zz}^0) в зависимости от угла его развала β . Видно, что по мере увеличения развала фальшборта дополнительное давление на палубу растет с 7,5% при $\beta=0^\circ$ до 20% при $\beta=45^\circ$ при крене судна $\theta=0^\circ$. При завале фальшборта на угол $\beta=-30^\circ$ суммарная нагрузка оказывается даже ниже на 2,5-3%, чем на модели без фальшборта (при $\theta=0^\circ$). При наличии развала фальшборта уровень давлений в направлении оси Oz при различных углах крена всегда превышает уровень давлений для корпуса без фальшборта, при этом увеличение C_{zz}^0 составляет (0,1–0,2).

На рис. 10 представлены графики изменения бокового давления на носовую оконечность при её зарывании в волну и обтекании потоком жидкости. Видно, что максимум бокового давления достигается

при крене $\theta \cong 55^\circ$ на носовой оконечности без фальшборта. При этом наличие фальшборта существенно увеличивает боковое давление (почти на 80%) в зависимости от угла его развала. Максимальное общее боковое давление с учётом влияния фальшборта составляет почти половину от давления на палубу, полученного при нулевом крене $\theta=0^\circ$. При этом следует отметить, что завал фальшборта внутрь корпуса на 30° приводит даже к некоторому снижению общего бокового давления на некоторых участках по сравнению даже с корпусом без фальшборта. Этот процесс наблюдается до углов крена $\theta \leq 45^\circ$.

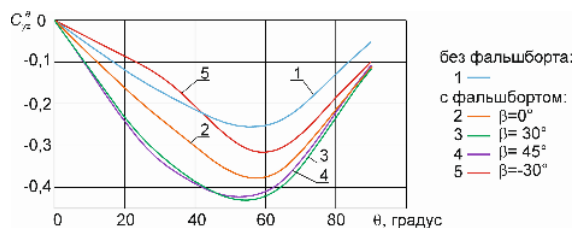


Рис. 10. Усилие, действующее на носовую оконечность перпендикулярно направлению обтекания

На рис. 11 представлены кривые изменения гидродинамических моментов судна, носовая оконечность которого находится в условиях вертикального обтекания при зарывании в волну. На графике четко просматриваются два экстремума, один из которых (Δ_1) обусловлен наличием фальшборта в конструкции носовой оконечности (фальшбортовая составляющая), а второй (Δ_2) создается носовой оконечностью корпуса, не содержащей фальшборта, и обусловлен соотношением главных размерений в носовой оконечности судна (корпусная составляющая).

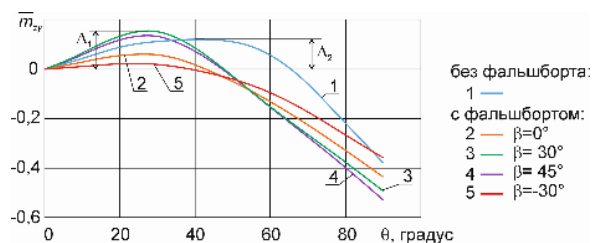


Рис. 11. Изменение гидродинамического момента, действующего на носовую оконечность судна при её зарывании в волну при $B/H=2$

Первый экстремум Δ_1 в районе $\theta=30^\circ$ показывает, как изменяется гидродинамический момент за счет изменения развала фальшборта. Видно, что наличие развала при $\beta=30^\circ$ и $\beta=45^\circ$ резко увеличивает экстремум гидродинамического восстанавливающего момента Δ_1 в начальной стадии крена судна. Достигнув экстремума (Δ_1) восстанавливающий момент падает до нуля при $\theta \approx 48^\circ$, а затем меняет знак, становясь опрокидывающим, возрастает по абсолютной величине и при $\theta=90^\circ$ составляет $\bar{m}_{zy} = -0,54$ при развале фальшборта $\beta=45^\circ$, что более чем в 1,4 раза выше, чем восстанавливающий момент, возникающий на носовой оконечности корпуса без фальшборта (кривая 1). При этом

гидродинамический момент при наличии завала фальшборта $\beta=-30^\circ$ всегда меньше последнего во всем диапазоне углов крена ($0-90^\circ$).

Видно, что при отсутствии фальшборта (кривая 1) гидродинамический момент сначала действует в одну сторону $\theta=0-65^\circ$ (восстанавливающий), а затем в обратную (кренящий). Четко просматриваются два участка, причем на первом участке ($\theta=0-65^\circ$) максимальное значение восстанавливающего момента составляет $\bar{m}_{zy} = 0,12$ при угле $\theta \approx 40^\circ$, а на втором кренящий момент составляет $\bar{m}_{zy} = -0,38$ при $\theta \approx 90^\circ$. Как видно из рис. 11, наличие фальшборта прямо стоящего и с завалом на $\beta=-30^\circ$ резко сокращает величину гидродинамического восстанавливающего момента на первом участке до $\bar{m}_{zy} = (0,05 \div 0,025)$, что делает его даже меньше, чем на носовой оконечности без фальшборта. При этом угол заката падает с $\theta=65^\circ$ до $\theta=42^\circ$.

Наличие фальшборта с развалом резко увеличивает максимальное значение восстанавливающих моментов как на первом участке до $\bar{m}_{zy} = 0,16$ (от $\theta=0^\circ$ до $\theta=42^\circ$), так и на втором почти до $\bar{m}_{zy} = -0,54$ (от $\theta=42^\circ$ до $\theta=90^\circ$, при этом он становится уже кренящим).

Таким образом, наличие фальшборта на исследуемом корпусе судна резко сокращает зону действия восстанавливающего момента (угол заката диаграммы) с 62° до 42° и несколько увеличивает значение восстанавливающего момента по сравнению с корпусом без фальшборта, а также существенно увеличивает значения опрокидывающих моментов на втором участке.

Опыт исследования гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность, показывает, что даже при отсутствии фальшборта их величина может достигать существенных значений. Это обусловлено наличием криволинейных поверхностей палубы и борта, которые и генерируют эти силы. Естественно предположить, что изменение соотношений площадей этих поверхностей приведет к изменению гидродинамических сил. Для количественной оценки этого эффекта рассмотрим конструкцию носовой оконечности с увеличенной высотой надводного борта в носу при $B/H=1$. С практической точки зрения это характерно для судов с большой седловатостью. Результаты исследования кренящих моментов для этой носовой оконечности представлены на рис. 12. В данном случае абсциссы обоих экстремумов Δ_1 и Δ_2 практически совпадают и находятся в области $\theta \approx 60^\circ$.

Видно, что для конструкции без фальшборта экстремум Δ_2 при угле $\theta \approx 60^\circ$ составляет $\bar{m}_{zy} = -1,0$, что почти на порядок больше, чем на предыдущей конструкции ($\bar{m}_{zy} = 0,12$ при $B/H=2$).

При этом кривая изменения кренящего гидродинамического момента на носовой оконечности с фальшбортом, угол развала которого равен $\beta=45^\circ$, показывает, что его значение возрастает почти на 50% по сравнению с конструкцией без фальшборта (см. рис. 12).

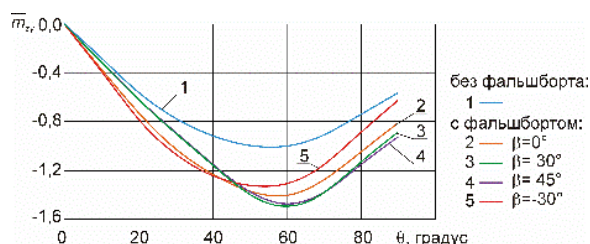


Рис. 12. Изменение гидродинамического момента, действующего на носовую оконечность судна при её зарывании в волну при $B/H=1$

Такое резкое увеличение влияния фальшборта на кренящие моменты обусловлено ростом плеча гидродинамических сил, действующих на фальшборт, относительно оси, проходящей через центр тяжести судна. Изменение соотношения площадей палубы и борта ведет и к увеличению других гидродинамических сил R_{zz}^{θ} и R_{yz}^{θ} и, соответственно, коэффициентов C_{zz}^{θ} и C_{yz}^{θ} .

Заключение

Комплекс проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Гидродинамические силы и моменты, возникающие на носовой оконечности в условиях ее зарывания в волну, в значительной степени определяются соотношением главных размерений и условий загрузки судна. Изменение загрузки судна приводит к изменению положения центральной оси, а, следовательно, и к изменению гидродинамических моментов и сил.

2. Фальшборт, установленный в носовой оконечности, существенно влияет на величину гидродинамических сил и моментов в зависимости от

угла развала и удаленности от оси вращения судна. Так, если фальшборт прямой или имеет завал внутрь корпуса, то величина гидродинамических сил и моментов может быть даже снижена по сравнению с корпусом без фальшборта. При развале фальшборта величины гидродинамических сил и моментов растут в зависимости от угла развала. В отдельных случаях увеличение гидродинамических моментов может составлять 40% и более в зависимости от формы корпуса судна, условий его загрузки и удаленности фальшборта от центра тяжести (оси вращения). Увеличение гидродинамических сил за счёт фальшборта менее значительно и составляет для вертикальных усилий до 20%, а для боковых усилий до 30% для исследуемой формы корпуса. Для других корпусов с другими обводами эти соотношения могут измениться.

3. Гидродинамические силы, действующие в поперечном направлении обтекания носовой оконечности, достигают значительных величин и на 80% и более увеличиваются за счет фальшборта в зависимости от угла его развала β и высоты.

4. При выходе корпуса из условий захвата волной носовой оконечности он будет претерпевать очень резкий разворот при большой угловой скорости, поэтому силы инерции будут играть большую роль при развитии катастрофы.

5. Отмеченные в настоящей работе закономерности изменения гидродинамических сил и моментов, действующих на носовую оконечность в условиях её зарывания в волну, позволяют предположить, что и собственно форма самой оконечности судна также существенно влияет на упомянутые гидродинамические характеристики, однако это отдельная самостоятельная задача исследования.

Литература

1. Бураковский П.Е. Экспериментальное исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в процессе захвата ее волной // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный выпуск 1. С. 146–152.
2. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография. СПб.: Лань, 2020. 300 с.
3. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Опыт использования технологии SPH для определения внешних сил, действующих на носовую оконечность судна в условиях ее захвата волной. БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ: материалы VIII Международного Балтийского морского форума 5-10 октября 2020 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской промышленности», VIII Международная научная конференция. Электрон. дан. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. С. 43–48.
4. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Нечаев Ю.И., Прохнич В.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф // Морской вестник. 2013. №1(45). С.89–95.
5. Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis // The Astronomical J. 1977. № 82. P. 1013–1024.
6. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars // MNRAS. 1977. № 181. P. 375–389.
7. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics. 1992. № 30. P. 543–574.
8. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) // Comput. Phys. Commun. 2015. Vol. 187. P. 204–216.
9. Altomare C., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Gonzalez-Cao J., Suzuki T., Gomez-Gesteira M., Troch P. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. Coast. Eng. 2017. Vol. 127. P 37–54.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость / Российский Морской Регистр судоходства. СПб.: PMPC, 2018. 82 с.

11. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее заливании на встречном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42), т. 3. С. 19-25.

References

1. Burakovskiy P.E. (2019). Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' sudna v protsesse zakhvata ee volnoy [Experimental study of hydrodynamic forces acting on the bow tip of the vessel during its capture by a wave]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, special issue 1, pp. 146–152.
2. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Konstruktivnoe obespechenie bezopasnosti moreplavaniya: monografiya [Constructive provision of navigation safety: monograph]. Saint Petersburg, Lan', 2020. 300 p.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Opyt ispol'zovaniya tekhnologii SPH dlya opredeleniya vneshnikh sil, deystvuyushchikh na nosovuyu okonechnost' sudna v usloviyakh ee zakhvata volnoy [Experience in using SPH technology to determine the external forces acting on the bow tip of the vessel in conditions of its capture by a wave]. Baltiyskiy morskoy forum: proceedings of VIII International Baltic Marine Forum 5-10 October 2020: In 6 volumes. Vol. 2. «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoy industrii», VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. – Kaliningrad: BGARF, 2020, pp. 43–48.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnikh V.P. (2013). Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof [Problems of controlling the dynamics of a ship in extreme situations based on the methods of modern disaster theory]. Morskoy vestnik, №1(45), pp. 89–95.
5. Lucy L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astronomical J., № 82, pp. 1013–1024.
6. Gingold R. A., Monaghan J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. MNRAS, № 181, pp. 375–389.
7. Monaghan J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, № 30, pp. 543–574.
8. Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. (2015). DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Comput. Phys. Commun., vol. 187, pp. 204–216.
9. Altomare C., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Gonzalez-Cao J., Suzuki T., Gomez-Gesteira M., Troch P. (2017). Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. Coast. Eng., vol. 127, pp. 37–54.
10. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of ships]. Part IV. Stability. Saint Petersburg, Russian register of shipping, 2018. 82 p.
11. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2018). K voprosu ob opredelenii nagruzki, deystvuyushchey na palubu sudna v nosovoy okonechnosti pri ee zalivani na vstrechnom volnenii [On the issue of determining the load acting on the deck of the vessel in the bow tip when it is flooded on a counter wave]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(42), Vol. 3, pp. 19–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.015.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.073>**Особенности колебаний регулярных перекрытий с одним стрингером при разном конструктивном оформлении**А.И. Притыкин¹ prit_alex@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Вибрация является одним из источников появления трещин в обшивке судовых перекрытий, когда, например, конструкция попадает в резонанс с вынужденными колебаниями от гребного винта или работы двигателя. Однако точный динамический расчет перекрытий даже в простейших случаях связан с весьма сложными выкладками. К тому же перекрытие в этом случае рассматривается как система балок с неясными геометрическими характеристиками из-за неопределенности величин присоединенных поясков. Наиболее эффективным методом исследования колебаний перекрытий является метод конечных элементов, позволяющий учесть все нюансы деформации конструкции при динамическом воздействии на нее. В данной работе проведены расчеты собственных частот и соответствующих им форм колебаний бортового перекрытия разного конструктивного оформления, связанного с размерами балок, их формой, размером шпации и характером опирания по контуру. Полученные результаты МКЭ и по известной расчетной зависимости в большинстве случаев согласуются удовлетворительно. Но отдельные расчеты показали, что увеличение шпации может привести к заметным изменениям характера и формы колебаний, когда шпангоуты испытывают не изгибные, а крутильные колебания при значительной вибрации обшивки между ними. Отмечается, что при некотором соотношении изгибных жесткостей стрингера и шпангоутов ширина присоединенного пояса стрингера может существенно уменьшаться по сравнению с принятой в Морском Регистре РФ. На основе проведенных исследований делается вывод, что наиболее надежным способом определения частот колебаний перекрытия является метод конечных элементов, сопровождаемый графической информацией о форме этих колебаний.

Ключевые слова: бортовое перекрытие, стрингер, присоединенный пояс, частота собственных колебаний, аналитический расчет, МКЭ.

Для цитирования: Притыкин А.И. Особенности колебаний регулярных перекрытий с одним стрингером при разном конструктивном оформлении, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 46—52.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.073>**Peculiarities of vibration of the regular grillage with one stringer and different design**Alexej I. Pritykin¹ prit_alex@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Vibration is one of sources of appearance of gaps in ship grillages, when for example grillage is subjected to resonance with external vibration from screw or main engine. But precise dynamic calculation of grillage even in simplest cases is joint with big complexities. By the way, a grillage in this case is considering as a system of beams with not fully clear geometric parameters because of indeterminate magnitudes of associated plates of hull plating. More efficient method of investigation of the grillage vibration is the finite element method, allowing take in a view all peculiarities of the construction under dynamic action on it. In this study it was calculated the natural frequencies and corresponding to them forms of vibration of the board grillage of different construction, such as dimensions of stringer, frame space and type of boundary conditions. Obtained by FEM results and on well-known relation for simply supported grillage in many cases are in good correlation. But some calculations show, that increasing of space can bring to changing in character and form of vibration, when frames have not flexural but torsional vibration with essential oscillation the hull plating. It is noted, that for some relations between flexural rigidities of stringer and frames the width of associated plate for stringer is less the recommended by Russian Maritime Register. On base of obtained by FEM results it is concluded, that only reliable way of determination of natural frequencies of grillage is the finite element method, accompanied with graphic information about form of vibration.

Key words: board grillage, stringer, associated plate, natural frequencies, vibration, analytical calculation, FEM.

For citation: Alexej I. Pritykin. Peculiarities of vibration of the regular grillage with one stringer and different design, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 46—52.

Введение

Перекрытие является одной из наиболее распространенных конструкций корпуса судна. Однако точный динамический расчет перекрытий даже в простейших случаях связан с весьма

сложными выкладками [1]. Лишь в учебнике А.А. Курдюмова [2] приводится достаточно простая зависимость для частот собственных колебаний перекрытия с одной перекрестной связью и большим числом балок главного направления. Поэтому большинство работ посвящено колебаниям балок [3-

5]. В аналитических расчетах перекрытие рассматривается как система балок с неясными геометрическими характеристиками из-за неопределенности величин присоединенных поясков [6]. С развитием компьютерных технологий упор делается на применении численных методов в расчетах колебаний корабельных конструкций [7-9]. Поэтому в данной работе исследование собственных частот и форм колебаний перекрытий осуществлялось методом конечных элементов, позволяющем учесть все нюансы деформации конструкции при динамическом воздействии на нее.

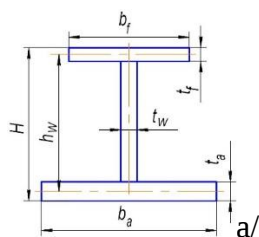
Знание частот колебаний важно в силу того, что трещины, появляющиеся иногда в обшивке корпуса, являются результатом попадания конструкции в резонанс с вынужденными колебаниями, вызванными винтом или работой главных двигателей.

1. Перекрытие со свободным опиранием по контуру

Приведенное в [2] выражение для первой частоты собственных колебаний перекрытия с одной перекрестной связью можно трансформировать к виду

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{Ei / A_f \rho} \sqrt{(1 + 2al^3 I / L^4 i) / (1 + 2aA_s / A_f l)} \quad (1)$$

где a - расстояние между шпангоутами; A_f и A_s - площади поперечного сечения шпангоута и стрингера соответственно с учетом присоединенного пояса $b_d \cdot t_d$ (рис.1а); i и I - моменты инерции шпангоута и стрингера; ρ - плотность материала

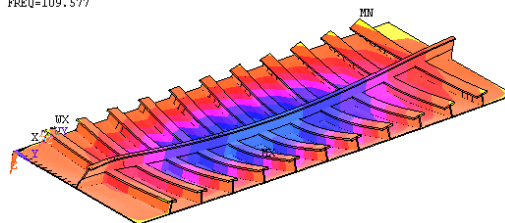


перекрытия; E - модуль Юнга; L и l - длина и ширина перекрытия; f - частота колебаний в герцах.

Произведем расчет перекрытия длиной $L = 6\text{ м}$ и шириной $l = 2\text{ м}$ с толщиной обшивки $t_d = 10\text{ мм}$ с 11-тью шпангоутами и одним стрингером (рис.1б). Размеры шпангоута $h_{wf} - t_{wf} - b_{ff} - t_{ff} = 150 - 15 - 150 - 20\text{ мм}$ и стрингера $h_{ws} - t_{ws} - b_{fs} - t_{fs} = 300 - 10 - 50 - 15\text{ мм}$. Присоединенный пояс шпангоута примем $b_{df} = 500\text{ мм}$, а стрингера $b_{ds} = 1000\text{ мм}$. В соответствии с заданными размерами площадь шпангоута, определяемая как $A_f = h_{wf} \cdot t_{wf} + b_{ff} \cdot t_{ff} + b_{df} \cdot t_{df}$ равна $A_f = 10250\text{ мм}^2$, а площадь стрингера $A_s = 13750\text{ мм}^2$. Моменты инерции шпангоута и стрингера будут соответственно $i = 4716\text{ см}^4$ и $I = 12450\text{ см}^4$. Плотность стали $\rho = 7.85 \cdot 10^{-9} \text{ Нс}^2 / \text{мм}^4$, модуль Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$.

При свободном опирании (с. о.) по контуру первая частота колебаний, определенная МКЭ, получилась равной $f^{МКЭ} = 109.6 \text{ Гц}$ (рис.1б), а расчет по зависимости (1) привел к значению $f^{(1)} = 107.2 \text{ Гц}$, что дает расхождение в $\delta = 2.2\%$.

FREQ=109.577



б/

$$f^{МКЭ} = 109.6 \text{ Гц}; f^{(1)} = 107.2 \text{ Гц}; \delta = 2.2\%$$

Рис. 1. Перекрытие 6м*2м с 11-тью шпангоутами и одним стрингером: а/ вид сечения; б/ форма колебаний 1-го тона и частота

Расчет МКЭ производился в системе ANSYS по разработанной автором программе [10] с использованием конечных элементов Shell63 размером $\Delta_{КЭ} = 0.05h_{ws}$. Граничные условия обеспечивались наличием опор по контуру перекрытия на уровне обшивки.

Произведем расчет этого же перекрытия, увеличив ширину его до 4 м при той же длине $L = 6\text{ м}$. Результаты расчета показали, что колебания 1-го тона происходят при частоте $f^{МКЭ} = 34.9 \text{ Гц}$ (рис.2а), а 2-го тона при $f_2^{МКЭ} = 57.8 \text{ Гц}$ (рис.2б).

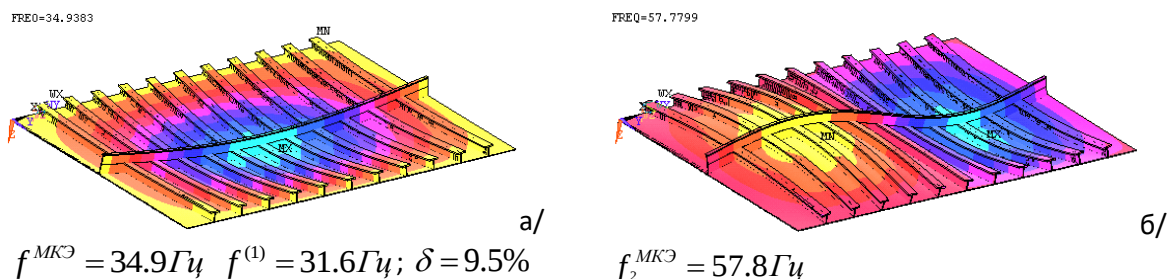
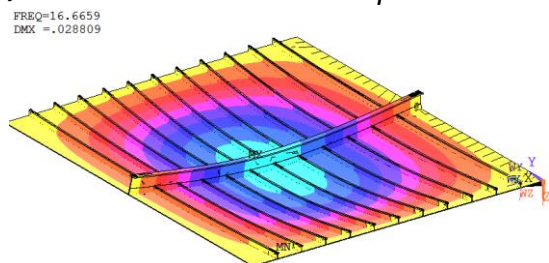


Рис.2. Колебания с.о. перекрытия 6м*4м со шпангоутами 150–15–150–20–500–10мм и стрингером 300–20–250–25–1000–10мм : а/ 1-го тона; б/ 2-го тона

Расхождение в частотах колебаний 1-го тона по (1) $f^{(1)} = 31.6 Гц$ и по МКЭ составляет $\delta = 9.5\%$. Сопоставить частоту колебаний 2-го тона не с чем, потому что нет готового теоретического решения.

В [2] указывается, что зависимость (1) надо пользоваться с большой осторожностью, так как при увеличении размеров стрингера может наступить момент, когда форма колебаний резко изменится и колебания шпангоутов будут образовывать две полуволны. Посмотрим, при каком соотношении размеров стрингера и шпангоута может произойти изменение формы колебаний. Посмотрим, при каком соотношении размеров стрингера и шпангоута может произойти изменение формы колебаний.

Рассмотрим перекрытие размерами 6м*6м (рис.3а) со шпангоутами 100–10–30–15мм и стрингером 300–15–100–20мм. Присоединенные пояски оставим такими же, как и в предыдущем варианте. Полученный по МКЭ результат колебаний 1-го тона $f^{МКЭ} = 16.7 Гц$

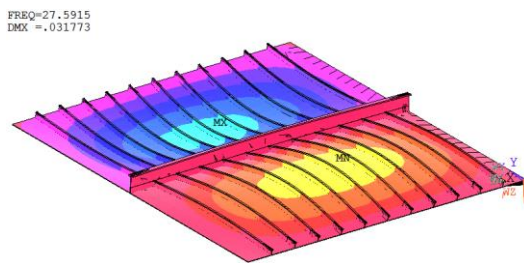


а/ $f^{МКЭ} = 16.7 Гц; f^{(1)} = 15.3 Гц; \delta = 8.4\%$

(рис.3а) отличается от расчета по (1) на $\delta = 8.4\%$. А вот форма колебаний 2-го тона при частоте $f_2^{МКЭ} = 27.6 Гц$ соответствует абсолютно жесткому стрингеру с формой колебаний шпангоутов по двум полуволнам (рис.3б). Фактически это эквивалентно колебанию перекрытия половинной ширины $l_1 = 3м$ без стрингера со свободным опиранием по контуру. Формулу для частоты колебаний в этом случае можно получить из (1), положив в ней второй корень равным единице, так как параметры стрингера не принимают участия в колебаниях. Тогда имеем

$$f = \frac{\pi}{2l_1^2} \sqrt{Ei / A_f \rho} \quad (2)$$

Вычисление по (2) приводит к значению частоты $f^{(2)} = 28.5 Гц$, что расходится с МКЭ на $\delta = 3.3\%$.



б/ $f_2^{МКЭ} = 27.6 Гц; f^{(2)} = 28.5 Гц; \delta = 3.3\%$

Рис.3. Колебания с.о. перекрытия 6м*6м со шпангоутами 100–10–30–15–500–10мм и стрингером 300–15–100–20–1000–10мм : а/ 1-го тона; б/ 2-го тона

При отсутствии стрингера (рис.4), можно отметить следующую особенность колебаний. При размерах перекрытия 6м*4м, толщине обшивки $t_d = 10мм$ и наличии 7-ми шпангоутов размерами 150–15–150–20мм частота колебаний по МКЭ равна $f^{МКЭ} = 31.6 Гц$ (рис.4а). Расчет по (2) при ширине присоединенного пояска $b_d = 750мм$ приводит к значению $f^{(2)} = 33.1 Гц$. Расхождение

$\delta = 4.7\%$. При увеличении размеров шпации до $a = 1000мм$ за счет уменьшения числа шпангоутов с 7-ми до 5-ти при тех же размерах перекрытия 6*4м и шпангоутах 150–15–150–20мм частота колебаний по МКЭ становится равной $f^{МКЭ} = 25.7 Гц$ (рис.4б), сопоставление с расчетом по (2) дает расхождение $\delta = 18.7\%$.

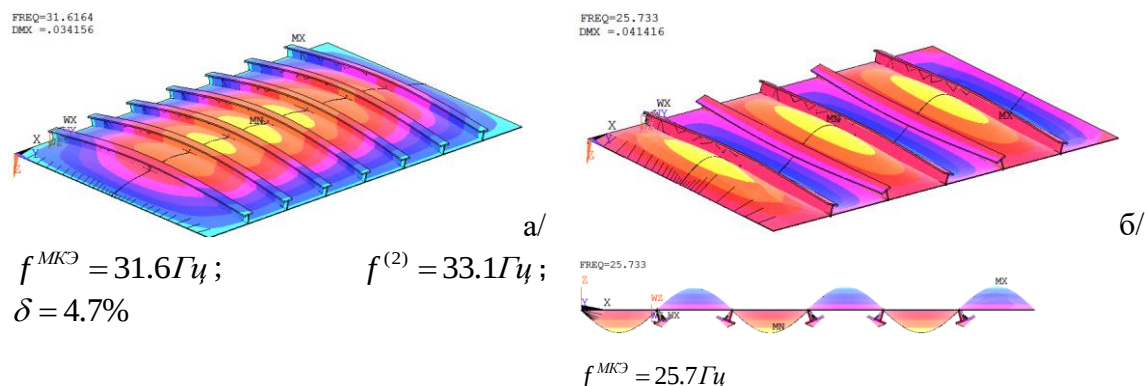


Рис.4. Колебания с.о. перекрытия 6м*4м со шпангоутами 150–15–150–20–1000–10мм : а/ с 7-ью шпангоутами; б/ с 5-ью шпангоутами размером

Из рис.4б видно, что существенно изменился характер колебаний: шпангоуты уже испытывают не изгибные, как в предыдущих случаях, а крутильные колебания, причем наблюдается вибрация обшивки между шпангоутами, которая и определяет низшую частоту колебаний перекрытия. Поэтому формула (2) здесь совершенно неприемлема. Но установить это можно, только наблюдая картину колебаний, из чего заключаем, что единственным надежным способом определения частот колебаний сложных конструкций является МКЭ, сопровождаемый графической информацией о форме колебаний.

Проверим расчетом частоту колебания изолированной пластины со свободным опиранием по контуру. В работе [2] приведена формула для частот колебаний свободно опертой пластины, которую можно преобразовать к виду

$$f_{c.o.} = \frac{\pi t_d (k^2 + n^2 \gamma^2)}{2a^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\mu^2)\rho}}, \quad (3)$$

где обозначено: a - длинная сторона пластины; $\gamma = a/b$ - отношение сторон; μ - коэффициент Пуассона; k и n - число полуволн в направлении каждой из сторон пластины.

Проведя расчет свободно опертой пластины размерами $a-b-t_d = 4000-1000-10$ мм по (3), получим при $k=1$ и $n=1$ результат равный $f^{(3)} = 26.1 Гц$, что отличается от данных по расчету перекрытия $f_{перекр}^{МКЭ} = 25.7 Гц$ (рис.4б) на 1.6%. Расчет пластины, выполненный МКЭ (рис.5), привел к результату

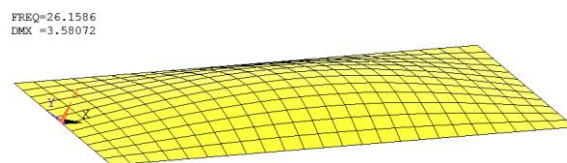
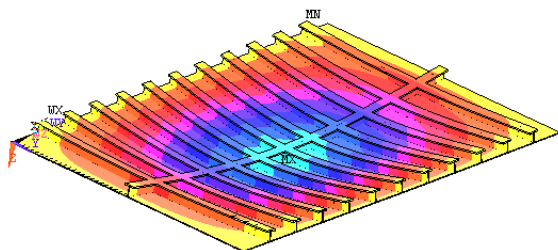


Рис.5. Колебания изолированной пластины размерами $a-b-t_d = 4000-1000-10$ мм

$f_{пласт}^{МКЭ} = 26.2 Гц$, который неплохо коррелируется с расчетом перекрытия МКЭ. Приведенные результаты подтверждают надежность расчетов колебаний МКЭ. Результаты расчета МКЭ перекрытия 6м*4м с балками одинакового размера 150–10–150–20–500–10 мм (рис.6а), показали, что частота колебаний 1-го тона $f^{МКЭ} = 34.5 Гц$ существенно (почти на $\delta = 10.7\%$) отличается от теоретической $f^{(1)} = 30.8 Гц$, подсчитанной по (1) при ширине присоединенных поясков стрингера $b_{ds} = L/6 = 1000$ мм и шпангоута $b_{df} = 500$ мм. Причиной столь значительного расхождения, на наш взгляд, может быть неверно принятая в теоретическом расчете величина b_{ds} стрингера. Столь малый профиль стрингера ($h_s = 150$ мм) не в состоянии включить в совместную работу обшивку шириной 1000 мм. Если же принять ширину присоединенного пояска стрингера $b_{ds} = 500$ мм, то результат теоретического расчета будет $f^{(1)} = 32.2 Гц$ с расхождением $\delta = 6.7\%$.

FREQ=34.4721

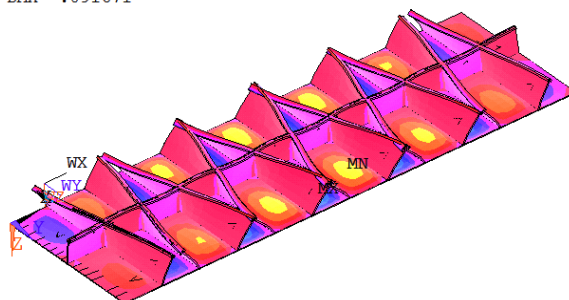


а/

$$f^{МКЭ} = 34.5 Гц; f^{(1)} = 30.8 Гц; \delta = 10.7\%$$

FREQ=73.8015

DMX = .091671



$$б/ f^{МКЭ} = 73.8 Гц; f^{(1)} = 175 Гц$$

Рис.6. Колебания перекрытий с одинаковыми размерами балок: а/ 6м*4м, 150–10–150–20–500–10 мм ;б/ 6м*2м, 300–15–50–20–500–10 мм

Если принять стрингер и шпангоуты высотой по 300 мм, то из картины, представленной на рис.6б, видно, что при относительно высоких балках и узких свободных поясах происходит не выпучивание перекрытия, а имеют место крутильные колебания шпангоутов, при этом стрингер остается прямым. Частота колебаний примерно в 2.4 раза ниже, чем определяемая по соотношению (1). И это понятно, так как имеют место совершенно разные виды колебаний. Это говорит о том, что определять частоты колебаний только по формулам вслепую весьма ненадежно. Надо представлять характер колебаний и тогда уже принимать решение о конструктивном оформлении перекрытия, размерах его балок для исключения возможного попадания в резонанс.

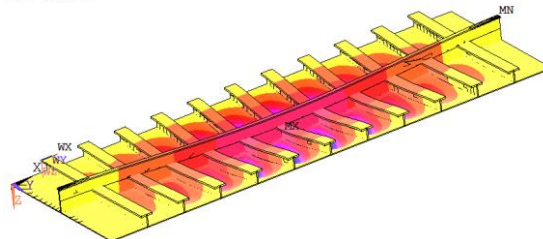
Скорее всего причиной таких колебаний стала высота балок при слишком узких свободных поясах, хотя такая же картина колебаний имеет место и при увеличенной до $b_d = 120 мм$ ширине свободных поясков. Надо отметить, что в реальных конструкциях свободного опирания шпангоутов нет, так как концы их приварены с помощью книц к флорам и бимсам. Такое закрепление ближе к жесткой заделке, которая и будет рассмотрена ниже. Свободное опирание было взято лишь потому, что расчетная аналитическая зависимость приведена в литературе именно для варианта свободного опирания.

2. Перекрытие с жесткой заделкой балок по контуру

Расчет перекрытия 6м*2м с жесткой заделкой (ж.з.) по контуру (рис.7) со шпангоутами 150–15–150–20–500–10 мм и стрингером 300–10–50–15–1000–10 мм приводит к увеличе-

FREQ=182.437

DMX = .077878



$$f^{МКЭ} = 182.4 Гц$$

Рис.7. Колебания ж.з. перекрытия 6м*2м со шпангоутами 150–15–150–20–500–10 мм и стрингером 300–10–50–15–1000–10 мм

нию частоты колебаний по сравнению со свободным опиранием в 1.67 раза, в то время как для изолированной балки смена характера закрепления повышает частоту в 2.27 раза [1].

3. Перекрытие со шпангоутами в форме уголков

Конструктивное оформление бортовых перекрытий корпусов судов допускает применение в качестве основных профилей шпангоутов типа уголка. Надо отметить, что такого рода конструкции характерны также для днищевых перекрытий наливных барж и легких танкеров с продольной системой набора, где роль перекрестных связей выполняют флоры [2].

Рассмотрим влияние формы профиля на колебания ж.з. бортового перекрытия 6м*4м, содержащего шпангоуты 150–15–150–20–500–10 мм типа уголков (рис.8а) и таврового сечения тех же размеров (рис.8б).

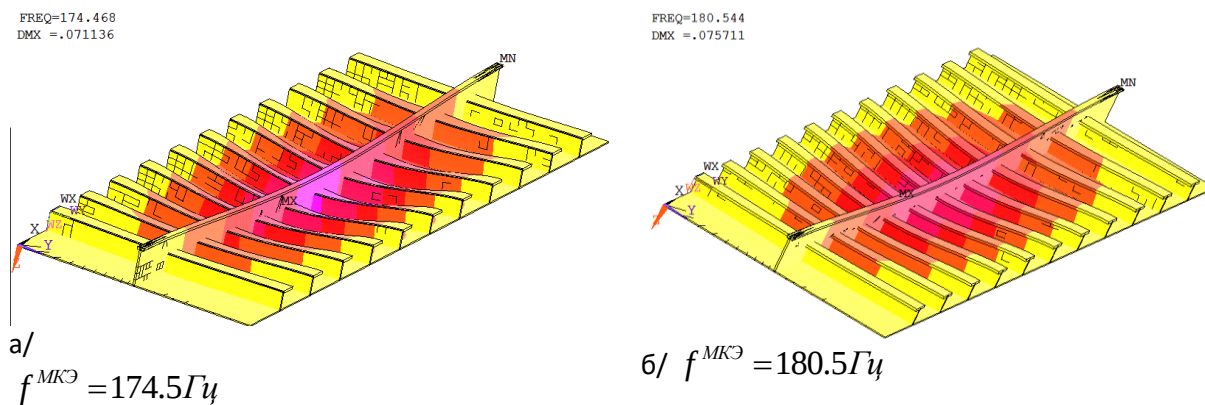


Рис.8. Колебания ж.з. перекрытия 6м*4м со стрингером 300–15–50–20–500–10мм и шпангоутами 150–15–150–20–500–10мм : а/ уголкового; б/ таврового профиля

Теоретически изменение формы профиля никак не отражается на величине момента инерции шпангоута, так как высота и размер полку у уголков и тавров приняты одинаковыми, а вот МКЭ позволяет выявить нюансы характера колебаний, связанные с наличием асимметрии профиля (уголков). Результат расчета МКЭ перекрытия 6м*4м показал, что частота колебаний 1-го тона $f^{МКЭ} = 174.5 Гц$ (рис.8а) со шпангоутами в виде уголков ниже частоты колебаний перекрытия со шпангоутами таврового профиля тех же размеров (рис.8б) всего на 3.4%.

Заключение

1. Приближенной формулой (1) для расчета колебаний свободно опертого перекрытия следует пользоваться с большой осторожностью, так как она справедлива в относительно узком диапазоне

параметров перекрытия, который сложно определить априори.

2. Формы колебаний перекрытий при разных параметрах могут существенно отличаться от форм, закладываемых при выводе расчетных зависимостей: кроме изгибных колебаний балок, могут возникать их крутильные колебания, а также существенной оказаться вибрация обшивки.

3. Исследования показали, что иногда ширина присоединенного пояска стрингера нуждается в корректировке, но это требует дополнительных исследований.

4. При одинаковых размерах балок форма шпангоутов (уголок или тавр) на частоту колебаний практически не влияет.

Из результатов расчетов можно сделать вывод, что единственным надежным способом определения частот колебаний перекрытия является метод конечных элементов, сопровождаемый графической информацией о форме колебаний.

Литература

1. Справочник по строительной механике корабля. Т.3. /Под ред. Паляя О.М. –Судостроение. 1982.317с.
2. Курдюмов А.А. Вибрация корабля. – Л.: Госиздат судостроительной промышленности. -1961. 320с.
3. Притыкин А.И. Анализ частот колебаний балок с регулярно расположенными вырезами//Морские интеллектуальные технологии.- 2021.-Т. 4.-№ 4.- С. 22—27.
4. Костин Г.В., Саурин В. В. О свободных колебаниях балок// Доклады Академии наук.- 2006. –Т. 411. -№ 5. – с.617-621.
5. Турищев Л.С. К определению собственных частот свободных колебаний неразрезных балок// Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Строительство.- 2007.- № 12. – С.34-38.
6. Притыкин А.И., Бугакова Н.Ю. Мороз В.С. Об оценке присоединенного пояска балок судовых перекрытий // Морские интеллектуальные технологии. - 2019.- т.1.- №2.- с.27-33.
7. Александров А.В., Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Шапошников В.М. Применение современных программных комплексов численной гидродинамики при решении задач прочности и вибрации конструкций корабля// Судостроение. -2012.- № 2. –С.23-27.
8. Щеголихин В.П. О возможности снижения уровней вибрации корпуса корабля // Судостроение. -2019.- № 6. –С.52-53.
9. Белов И.М., Зенков С.Г. Расчетно-экспериментальные исследования вибрации корабельных конструкции // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. -2011.- № 60. – С. 71-80.
10. Притыкин, А.И. Программа Vibration-Grillage создания и расчета МКЭ параметров вибрации модели перекрытия со шпангоутами и стрингерами // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2020666697 РФ от 21.12.2020г.

References

1. Spravochnik po stroitel'noj mehanike korablia [Manual on Structural mechanics of ship]. V.3. /Under edit. of O.M. Paliy. Shipbuilding. 1982. 318p.
2. Kurdjumov A.A. Vibrazia korablja [Vibration of ships]. L.: Sudpromgiz. 1961. 319p
3. Pritykin A.I. Analiz chastot kolebanij balok s reguljarno raspolozhennymi vyrezami [Anlysis of frequencies of oscillation of beams with regular openings // Marine intellectual technologies.- 2021.-V4.- part 4, P. 22—27.
4. Kostin G.V., Saurin V. V. O svobodnyh kolebaniyah balok [About natural vibration of beams] // Reports of Academy of Science.- 2006.- V. 411.-№ 5. P.617-621.
5. Turishchev L.S. K opredeleniju sobstvennykh chastot svobodnykh kolebanij nerazreznykh balok [To determination of proper friquancies of natural vibration of continuous beams] // Gerald of Polozk state university. Seria B. Applied Sci. Construction.- 2007.-№12. -P. 34-38.
6. Pritykin A.I., Bugakova N.Ju., Moroz V.S. Ob otsenke prisoedinennogo pojaska balok sudovyh perekrytij [About evaluation of attached plate of beams of the ship grillages] // Marine intellectual technologies.- 2019. V1.- part 2.- P. с.27-33
7. Alexandrov A.V., Kryzhevich G.B., Nor'kov E.S., Shaposhnikov B.M. Primenenie sovremennyh programmnyh komplexov chislennoj gidromehaniki pri reshenii zadach prochnosti I vibrazii konstrukzij korablya [Application of modern program complexis of numerical gidromechanica under solution of tasks of strength and vibration of the ship structures. // Shipbuilding.- 2012.- № 2. –P.23-27.
8. Shchegolihin V.P. [O vozmozhnosti snizsheniya urovney vibrazii of the vessel hull [About possible reducing of level of vibration of the vessel hull // Sudostroenie.- 2019.- № 6. –P.52-53
9. Belov I.M., Zenkov S.G. Raschetno-experimental'nye issledovaniya vibrazii korabel'nyh konstrukzij [Calculation and experimental research of vibration of ship structures] // Trudy ZNII acad. A.N. Krylov.- 2011. -№ 60. – P. 71-80.
10. Pritykin A.I. Programma Vibration-Grillage sozdania I rascheta MKE parametrov vibrazii modeli perekrytia so shpangoutami I stringerami [Program Vibration-Grillage creation and calculation by FEM parameters of vibration of Grillage model with spaces and stringers], // Svidetel'stvo o gosregistrzii programmy dlja EVM №202066697 RUS 21.12.2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Игоревич Притыкин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Alexej I. Pritykin, Dr.Sci.(Eng), associate professor, professor of the department of shipbuilding, ship repair and marine engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovietskij ave., 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

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

Научная статья

УДК 621.436.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.062>

Формирование многофакторной модели для функционального диагностирования топливной аппаратуры судовых дизелей

Л.И. Ковальчук¹, bgarf1988@inbox, М.В. Бураковская¹, bgarf1988@inbox,
И.М. Яворский¹, igor0909hp@gmail.com

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Анализ данных по надежности работы отдельных узлов и элементов конструкции судовых дизелей позволяет заключить, что до настоящего времени топливная аппаратура остается наиболее уязвимым в эксплуатационном отношении узлом двигателя. В статье излагается метод формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей, позволяющих реализовать процесс функционального диагностирования технического состояния топливной аппаратуры судовых дизелей в поле возможных режимов работы. Анализ скоростных характеристик четырех- и двухтактных дизелей показывает, что в большинстве случаев эти взаимосвязи могут быть аппроксимированы полиномами второго порядка. При этом за эталон принимаем поле рабочих режимов комплекта топливной аппаратуры; количественная оценка свойств этого поля достигается посредством представления контролируемых параметров в виде полинома, который является диагностической моделью; диагностическим параметром является константа, численное значение которой не зависит от характеристики, по которой работает двигатель, и остается неизменным во всех точках поля до тех пор, пока рабочие процессы в элементах топливной аппаратуры соответствуют эталону. Предложен алгоритм выполнения вычислительных операций, позволяющий минимизировать влияние погрешностей исходных данных (ИД) на достоверность определения параметров моделей. Контроль за качеством функционирования топливной аппаратуры, обнаружение и своевременное устранение неисправностей позволит повысить надежность двигателя в целом, поддерживать на заданном уровне его энергетические и экономические показатели.

Ключевые слова: метод, многофакторная модель, полином, погрешность, алгоритм, функциональное диагностирование, топливная аппаратура.

Для цитирования: Ковальчук Л.И., Бураковская М.В., Яворский И.М. Формирование многофакторной модели для функционального диагностирования топливной аппаратуры судовых дизелей. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 53—58.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.062>

Formation of a multifactorial model for functional diagnostics of marine diesel fuel equipment

Leonid I. Kovalchuk¹ bgarf1988@inbox.ru, Marina V. Burakovskaya¹ bgarf1988@inbox.ru,
Igor M. Yavorskiy¹ igor0909hp@gmail.com

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. An analysis of the data on the reliability of the operation of individual units and structural elements of marine diesel engines allows us to conclude that, to date, the fuel equipment remains the most vulnerable engine unit in operational terms. The article describes a method for the formation of invariant experimental and theoretical models that allow to implement the process of functional diagnostics of the technical condition of the fuel equipment of marine diesel engines in the field of possible operating modes. An analysis of the speed characteristics of four- and two-stroke diesel engines shows that in most cases these relationships can be approximated by second-order polynomials. In this case, the field of operating modes of the fuel equipment set is taken as a standard; a quantitative assessment of the properties of this field is achieved by representing the controlled parameters in the form of a polynomial, which is a diagnostic model; the diagnostic parameter is a constant, the numerical value of which does not depend on the characteristic, according to which the engine operates, and remains unchanged at all points of the field as long as the working processes in the elements of the fuel equipment correspond to the standard. An algorithm for performing computational operations is proposed, which makes it possible to minimize the influence of initial data errors on the reliability of determining model parameters. Control over the quality of the functioning of the fuel equipment, detection and timely elimination of faults will improve the reliability of the engine as a whole, maintain its energy and economic indicators at a given level.

Key words: method, multifactorial model, polynomial, error, algorithm, functional diagnostics, fuel equipment.

For citation: Leonid I. Kovalchuk, Marina V. Burakovskaya, Igor M. Yavorskiy. Formation of a multifactorial model for functional diagnostics of marine diesel fuel equipment. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 53—58.

Введение

Как показывают статистические данные по надёжности судовых дизелей, до настоящего времени наибольшее число их отказов связано с топливной аппаратурой (ТА). Особенно остро данная проблема стоит для дизелей с повышенной форсировкой, т.е. при $P_{me} > 1,0 \div 1,2$ МПа – для 2-тактных, и $P_{me} > 1,4 \div 1,9$ МПа – для 4-тактных дизелей [1–3].

Трудности в выявлении многих неисправностей ТА связаны с тем, что эти неисправности зачастую проявляются постепенно, и влияют на экономические и энергетические показатели дизелей подобно тому, как и отказы в системе газо-воздушного тракта. Изложенным определяется актуальность применения методов и средств безразборного диагностирования ТА судовых дизелей в эксплуатационных условиях [4, 5].

Анализ результатов опубликованных исследований по функциональному диагностированию ТА судовых дизелей позволяет сделать следующие выводы:

- качество функционирования ТА судовых дизелей следует отнести к числу объектов диагностирования первой очереди, т.к. протекающие в ТА процессы оказывают большое влияние на энергетические и экономические показатели дизеля;
- в большей степени решены и представлены конкретными результатами задачи функциональной диагностики ТА дизелей, работающих по нагрузочным характеристикам. Задачи, связанные с оценкой качества функционирования ТА главных дизелей имеют постановочный характер.

Ниже излагается метод решения этих задач посредством многофакторных моделей-эталонов.

1. Метод формирования моделей

В последующем способность нового комплекса ТА выполнять свою функцию будем характеризовать полем возможных рабочих режимов [6, 7].

Оно представляет собой часть плоскости $g_u - h$, которая определяется слева и справа вертикальными прямыми $h_{min} = const$ и $h_n = const$, сверху и снизу – зависимостями $g_u = f(h)$, для постоянных частот вращения $n_{min} = const$ и $n_n = const$ (см. рис. 1).

В выделенную таким способом область входит всё множество режимов, на которых допускается продолжительная эксплуатация дизеля. При этом на положение границ данной области не оказывает влияние то обстоятельство, по какой характеристике работает двигатель. Однако ухудшение качества функционирования комплекта ТА неизбежно приведет к смещению границ области. Учитывая эти свойства описанной области, в последующем она принимается за эталон.

Перейдем к количественной оценке эталона. Для этого воспользуемся соображениями, изложенными в [6].

Положим, что в поле рабочих режимов комплекта ТА контролируются значения параметров

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. Осуществим построение такой функции этих параметров, значение которой на всей указанной выше области неизменно:

$$f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n; x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – определяющие параметры (входные и выходные), т.е. информативные параметры;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – подлежащие вычислению параметры.

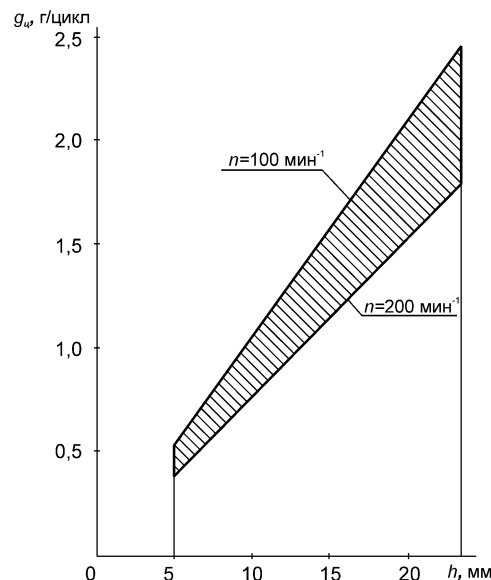


Рис. 1. Поле режимов работы комплекта ТА двигателя ЧН 32/48

Для установления явного вида зависимости (1) воспользуемся результатами экспериментальных исследований ТА. Они свидетельствуют о том, с изменением технического состояния элементов ТА (возникновением неисправностей) происходит сохранение характера взаимосвязей параметров, при этом происходит только их подобное преобразование. С учётом этого обстоятельства для нахождения левой части выражения (1) можно воспользоваться следующим алгоритмом.

На первом этапе следует осуществить выбор функциональной зависимости для выполнения аппроксимации взаимосвязи входных и выходных информативных параметров (отдельно по каждой скоростной характеристике). В результате исследования скоростных характеристик 4-тактных и 2-тактных дизелей было установлено, что, как правило, для аппроксимации взаимосвязей могут быть использованы полиномы второго порядка

$$x_1(h) + x_2(h) \cdot a_1 + x_3(h) \cdot a_1^2 = a_2, \quad (2)$$

где a_1 и a_2 – величины параметров: входного (в дизель) и выходного (из цилиндров);

$x_1(h), x_2(h), x_3(h)$ – подлежащие вычислению параметры в функции от хода рейки ТНВД.

В последующих вычислениях целесообразно использовать относительные значения параметров

$$a_{10} = \frac{a_1}{a_{1H}}; a_{20} = \frac{a_2}{a_{2H}}; a_{30} = \frac{a_3}{a_{3H}}; \dots; a_{n0} = \frac{a_n}{a_{nH}}. \quad (3)$$

Здесь индекс "H" относится номинальному режиму работы нового комплекта ТА. Тогда

$$x_1(h_0) + x_2(h_0) \cdot a_{10} + x_3(h_0) \cdot a_{10}^2 = a_{20}, \quad (4)$$

где a_{10} и a_{20} – входной в двигатель и выходной из цилиндров параметры, приведённые к безразмерному виду;

$x_1(h_0)$, $x_2(h_0)$, $x_3(h_0)$ – подлежащие отысканию параметры в функции от хода рейки ТНВД.

Изложенное выше позволяет установить принципиальное различие предлагаемого подхода к оценке качества функционирования ТА по сравнению с известными методиками. Они сводятся к следующему:

– за эталон принимаем поле рабочих режимов комплекта ТА;

– количественная оценка свойств этого поля достигается посредством представления контролируемых параметров в виде полинома (4), который является диагностической моделью;

– диагностическим параметром является константа (правая часть комплекса (4)), численное значение которой не зависит от характеристики, по которой работает двигатель, и остается неизменным во всех точках поля до тех пор, пока рабочие процессы в элементах ТА соответствуют эталону.

Именно благодаря названным особенностям появляется реальная возможность решать вопрос о качестве функционирования ТА при работе двигателей на потребители, имеющие нестабильные характеристики.

2. Пример построения многофакторной модели для функционального диагностирования ТА

Покажем применение изложенных теоретических предпосылок для построения многофакторной модели конкретного комплекта ТА. Для этой цели воспользуемся результатами испытаний комплекта ТА двигателя ЧН 32/48 на стенде по серии скоростных характеристик $g_{uo} = f(n_o)$ (см. рис. 2).

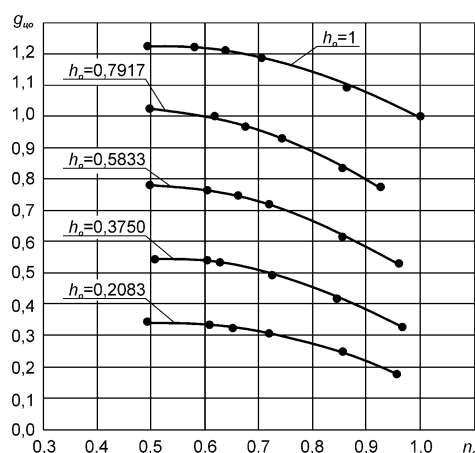


Рис. 2. Скоростные характеристики ТА двигателя ЧН 32/48

В дальнейшем будем производить расчёты с параметрами, приведёнными к безразмерному виду:

$$g_{uo} = \frac{g_u}{g_{uH}}; n_o = \frac{n}{n_H}; h_o = \frac{h}{h_H}, \quad (5)$$

где g_{uH} , n_H и h_H – значения нормирующих параметров, здесь составляющие: $g_{uH} = 2,13$ г/цикл; $n_H = 500$ мин⁻¹; $h_H = 24$ мм.

На рис. 2 приведены скоростные характеристики ТА дизеля ЧН 32/48 в системе координат $g_{uo} = f(n_o)$.

Рис. 2 показывает, что кривые монотонны, поэтому аппроксимация целесообразна с использованием полиномов второго порядка

$$g_{uo} = x_1(h_o) \cdot n_o^2 + x_2(h_o) \cdot n_o + x_3(h_o). \quad (6)$$

При этом для всей совокупности характеристик можно применить систему, представленную ниже:

$$\begin{aligned} 1. g_{uo} &= -0,8632 \cdot n_o^2 + 0,8321 \cdot n_o + 1,0277, \\ h_o &= 1,0; \\ 2. g_{uo} &= -1,0902 \cdot n_o^2 + 0,9608 \cdot n_o + 0,8175, \\ h_o &= 0,7917; \\ 3. g_{uo} &= -1,0545 \cdot n_o^2 + 0,9862 \cdot n_o + 0,5524, \\ h_o &= 0,5833; \\ 4. g_{uo} &= -0,9807 \cdot n_o^2 + 0,9580 \cdot n_o + 0,3153, \\ h_o &= 0,3750; \\ 5. g_{uo} &= -0,8057 \cdot n_o^2 + 0,8193 \cdot n_o + 0,1337, \\ h_o &= 0,2083. \end{aligned} \quad (7)$$

Представленная выше система (7) может быть использована для нахождения подлежащих вычислению параметров $x_1(h_o)$, $x_2(h_o)$, $x_3(h_o)$ в функции от частоты вращения, т. е. $g_{uo} = f(n_o)$.

Указанные зависимости представлены на рис. 3 в виде $x_1 = f(h_o)$; $x_2 = f(h_o)$; $x_3 = f(h_o)$.

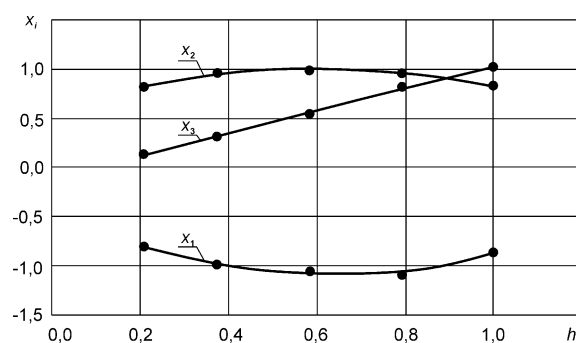


Рис. 3. Графики изменения параметров $x_1 = f(h_o)$; $x_2 = f(h_o)$; $x_3 = f(h_o)$

Характер этих кривых позволяет воспользоваться для их аппроксимации полиномами второго порядка:

$$\begin{aligned} 1. x_1(h_o) &= 1,5886 \cdot h_o^2 - 2,0186 \cdot h_o - 0,4480; \\ 2. x_2(h_o) &= -1,083 \cdot h_o^2 + 1,3126 \cdot h_o + 0,6006; \\ 3. x_3(h_o) &= -0,0267 \cdot h_o^2 + 1,1777 \cdot h_o - 0,1160. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки зависимости (8) в выражение (6) нетрудно получить уравнение поверхности для

дизеля ЧН32/48 в диапазоне изменения хода рейки ТНВД $0,2083 \leq n_o \leq 1,0$:

$$g_{цор} = (1,5886 \cdot h_o^2 - 2,0186 \cdot h_o - 0,4480) \cdot n_o^2 + (-1,0830 \cdot h_o^2 + 1,3126 \cdot h_o + 0,6006) \cdot n_o + (-0,0267 \cdot h_o^2 + 1,1777 \cdot h_o - 0,1160). \quad (9)$$

Распределение погрешностей расчета, выполненного с использованием (9), для всей совокупности исходных данных (ИД) для дизеля ЧН32/48 показано на рис. 4. Нетрудно заметить, что зависимость (9) позволяет воспроизвести всю совокупность ИД с погрешностью не более $\pm 5\%$. Это не превышает ожидаемую суммарную погрешность ИД.

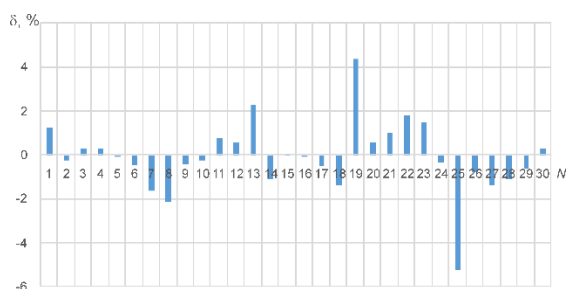


Рис. 4. Погрешности расчёта с использованием зависимости (9) по всей совокупности ИД

На основе (9), посредством представления $g_{цор} = f(g_{цоз})$, может быть сформирована единая эталонная зависимость двигателя ЧН 32/48, представленная на рис. 5.

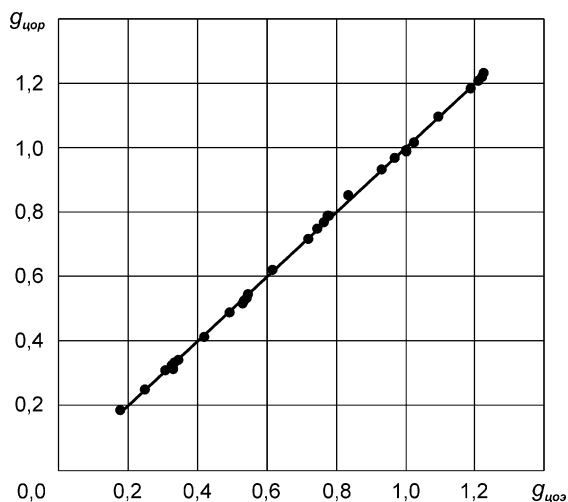


Рис. 5. Эталонная зависимость для дизеля ЧН32/48

Полученную модель целесообразно представить графически в виде прямой линии, исходящей из начала координатной системы. Для комплекта ТА двигателя ЧН 32/48 такое представление приведено на рис. 5. Оно позволяет преобразовать поле, показанное на рис. 1, в прямую линию, которая представляет собой эталон и совместно с моделью (9) используется для оценки качества функционирования комплекта ТА.

Возможность оценки качества функционирования комплекта ТА посредством модели (9) проверялась на специальном стенде для испытаний ТА.

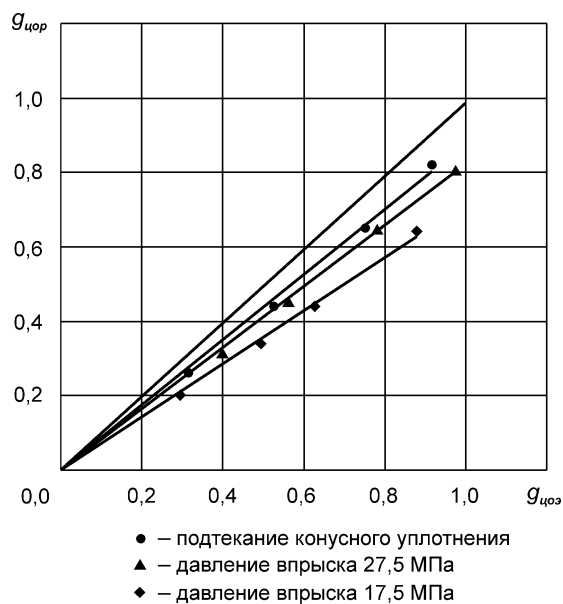


Рис. 6. Результаты диагностирования

В комплект ТА двигателя ЧН 32/48 искусственно вводились неисправности. На произвольных режимах, соответствующих полю, показанному на рис. 1, производился замер параметров g_u, h, n , определялись относительные значения параметров.

Испытания проводились при давлениях впрыска 27,5 МПа и 17,5 МПа, а также с распылителем, бракованным по плотности конусного уплотнения. Результаты диагностирования приведены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что перечисленные неисправности при их индивидуальном и комбинированном проявлении могут быть обнаружены с помощью модели типа (9). Наибольшее проявление указанных неисправностей имеет место на режимах работы близких к номинальному. При этом бракованный конусный уплотнитель распылитель дает примерно такую же величину отклонения, как и затяжка пружины до давления 27,5 МПа. Разрегулировка пружины до давления 17,5 МПа вызывает еще больше отклонение диагностического параметра от эталона.

Следует отметить, что полученные результаты диагностирования комплекта ТА двигателя ЧН 32/48 хорошо согласуются с физическими представлениями о процессах впрыска топлива в цилиндры дизелей. Действительно, всякое ослабление затяжки пружины, при исправно функционирующем насосе высокого давления, вызывает более раннее открытие иглы распылителя и, следовательно, за один и тот же угол поворота кулачка вала в цилиндр будет подано большее количество топлива. Ясно, что качество распыла при этом ухудшается. Аналогично проявляемся и неплотность конического уплотнения распылителя.

Таким образом, посредством модели (9) в комплекте ТА могут быть обнаружены неисправности, вызванные ослаблением затяжки пружины или ее поломкой, нарушением герметичности конусного уплотнения распылителя при их индивидуальном и комбинированном проявлении.

Заключение

В заключение следует отметить, что контроль за качеством функционирования ТА, обнаружение и своевременное устранение неисправностей позволит повысить надежность двигателя в целом, поддерживать на заданном уровне его энергетические и экономические показатели.

Литература

1. Воробьев Б.Н., Надежкин А.В., Кича Г.П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37), т.2. С. 112–120.
2. Кича Г.П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. 1985. Т. 21, №2. С. 28–30.
3. Кича Г.П., Воробьев Б.Н., Семенюк Л.А. Комбинирование фильтрования и центрифугирования – эффективный метод полнопоточной тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42), т.5. С. 59–65.
4. Кича Г.П., Семенюк Л.А., Тарасов М.И. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объемным фильтрованием // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1(47), т.2. С. 105–112.
5. Надежкин А.В., Кича Г.П., Семенюк Л.А. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37), т.2. С. 93–100.
6. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Расчет и контроль ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4(38), т. 2. С. 100–104.
7. Ковальчук Л.И., Исаева М.В., Мясников Ю.Н. Формирование моделей и алгоритмов для контроля механической напряженности судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4(46), т. 4. С. 67–72.

References

1. Vorob'ev B.N., Nadezhkin A.V., Kicha G.P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnyh geterogennyh sistem sudovyh ustroystv na osnove predstavlenij i apparata sluchajnyh markovskih processov [Stochastic separation modeling of complex heterogeneous systems of ship devices on the basis of the concepts and apparatus of random markov processes]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2017, №3(37), t.2, s. 112-120.
2. Kicha G.P. Ochistka masla v dvigateljah vnutrennego sgoraniya [Oil cleaning in internal-combustion engines]. Himija i tehnologija topliv i masel, 1985, t. 21, №2, s. 28-30.
3. Kicha G.P., Vorob'ev B.N., Semenjuk L.A. Kombinirovanie fil'trovaniya i centrifugirovaniya – jeffektivnyj metod polnopotochnoj tonkoj ochistki masla v dvuhkonturnyh sistemah smazki sudovyh dizelej [The combination of filtration and centrifugation – an efficient method is full-flow fine filtration of oil in a dual circuit lubrication systems of marine diesel engines]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2018, №4(42), t.5, s. 59-65.
4. Kicha G.P., Semenjuk L.A., Tarasov M.I. Stokhasticheskaja jacheistaja model' ochistki motornogo masla ot mehanicheskikh primesej ob#jomnym fil'trovaniem [Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2020, №1(47), t.2, s. 105–112.
5. Nadezhkin A.V., Kicha G.P., Semenjuk L.A. Optimizacija rezhimov kombinirovannoj ochistki motornogo masla v sudovyh dizeljah metodami variacionnogo ischislenija [The approaches of the variation solution of combined cleaning modes of motor oil in marine diesel engines]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2017, №3(37), t.2, s. 93-100.
6. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V. Raschet i kontrol' ogranichitel'nyh po teplovoj naprjazhennosti harakteristik sudovyh dizelej [Calculation and control of limiting thermal intensity characteristics of marine diesel engines]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2017, № 4(38), t. 2, s. 100–104.
7. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V., Mjasnikov Ju.N. Formirovanie modelej i algoritmov dlja kontrolja mehanicheskoi naprjazhennosti sudovyh dizelej [Formation of models and algorithms for control of mechanical tension of marine diesel engines]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2019, №4(46), t. 4, s. 67–72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Игнатьевич Ковальчук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации перевозок, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Leonid I. Kovalchuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, professor of the Department of transportation organization, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Марина Васильевна Бураковская, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Marina V. Burakovskaya, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of transportation organization, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Игорь Маркович Яворский, студент, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Igor M. Yavorskiy, student, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: igor0909hp@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 621.316.174

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.063>**Управление феррорезонансным контуром в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью**И.Е. Кажекин¹ kazhekin@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация В работе предлагается метод управления феррорезонансным контуром, который образуется при однофазных замыканиях в низковольтных электрических сетях с компенсированной нейтралью. Метод предусматривает введение в цепь заземляющего нейтраль реактора на непродолжительное время дополнительного активного сопротивления. При разработке способа использованы различные подходы для анализа феррорезонансных процессов. В исследовании рассмотрены переходные процессы при формировании контура. Определена необходимая величина дополнительного сопротивления и продолжительность его введения, необходимые для устранения феррорезонанса. Полученные при помощи моделирования результаты исследования процессов в феррорезонансном контуре были полностью подтверждены экспериментально. Предлагаемый способ позволяет устранить феррорезонансные процессы, не вызывая при этом длительное искажение тока реактора, а, следовательно, и тока в месте замыкания. Тем самым решается проблема использования компенсированной нейтрали в низковольтных судовых электросетях, обусловленная соединением для гальванической развязки емкостных элементов последовательно с нелинейным в большинстве случаев реактором.

Ключевые слова: Феррорезонанс, однофазные замыкания, судовые электросети, режим нейтрали, компенсированная нейтраль, токи замыкания.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Для цитирования Кажекин И.Е. Управление феррорезонансным контуром в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 59—64.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.063>**Control of a ferroresonant circuit in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral**Ilya E. Kazhekin¹ kazhekin@mail.ru¹ Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a method for controlling a ferroresonant circuit, which is formed during single-phase short circuits in low-voltage electrical networks with a compensated neutral. The method involves the introduction of an additional active resistance into the circuit of the grounding neutral of the reactor for a short time. When developing the method, various approaches were used to analyze ferroresonant processes. The study considers transient processes during the formation of a ferroresonant circuit. The required value of additional resistance and the duration of its introduction into the circuit to eliminate ferroresonance are determined. The results of studying the processes in the ferroresonant circuit obtained by means of simulation have been confirmed experimentally. The proposed method makes it possible to eliminate ferroresonant processes without causing long-term distortion of the current in the reactor circuit and the current at the fault point. The proposed method solves the problem of using a compensated neutral in low-voltage ship electrical networks, which is caused by connecting capacitive elements in series with a reactor, which is non-linear in most cases, for galvanic isolation.

Key words: Ferroresonance, single-phase faults, marine electrical networks, neutral mode, compensated neutral, fault currents.

Financial Support: The work was supported financially by the Federal Agency for Fisheries (contract no. 122030900054-0).

For citation: Ilya E. Kazhekin, Control of a ferroresonant circuit in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 59—64.

Введение

В низковольтных судовых электросетях наиболее распространенным видом повреждений являются замыкания фазы на корпус. Этот вид замыкания не считается аварийным и не требует немедленного отключения поврежденного участка, поскольку бортовые электросети работают в режиме изолированной нейтрали. При таком режиме

нейтрали ток в месте замыкания во многом определяется фазной емкостью электросети. В низковольтных электросетях большинства объектов морской техники он не превышает величины 1 А.

Как показывает опыт эксплуатации, режим однофазного замыкания в бортовых электросетях может существовать достаточно длительное время, в течение которого через место повреждения

протекает ток, а на изоляцию здоровых фаз воздействуют перенапряжения. Эти факторы способствуют тому, что простое замыкание фазы на корпус может развиваться в междуфазное короткое замыкание, привести к взрыву, воспламенению, электротравмам. Особенно опасны однофазные замыкания в разветвленных электросетях, обладающих достаточно большой емкостью. В таких электросетях токи замыкания могут достигать значений, достаточных для возникновения устойчивых дуговых процессов.

В [1] показано, что наиболее рациональным способом защиты от основных опасностей однофазных замыканий в низковольтных судовых электросетях является их перевод в режим заземления нейтрали через реактор, т.е. перевод в режим компенсированной нейтрали. Такой режим нейтрали позволяет одновременно уменьшить емкостную составляющую токов однофазного замыкания и перенапряжений, возникающих при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна.

1. Формирование феррорезонансного контура

Проблема реализации компенсации токов однофазных замыканий в низковольтных электросетях заключается в том, что заземление нейтрали должно сочетаться с непрерывным контролем сопротивления изоляции постоянному току. Это осуществляется при помощи гальванической развязки за счет ввода емкостного элемента в цепь реактора. Пример подключения компенсатора к электросети показан на рис. 1.

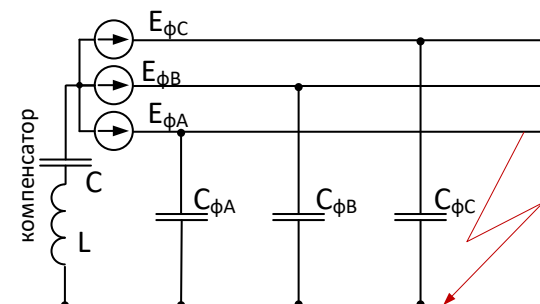


Рис. 1. Схема подключения заземляющего реактора к судово́й электросети при однофазном замыкании на корпус

$C_{\Phi A}, C_{\Phi B}, C_{\Phi C}$ – фазные емкости электросети;
 C – разделительная емкость устройства заземления нейтрали;
 $E_{\Phi A}, E_{\Phi B}, E_{\Phi C}$ – фазные ЭДС электросети;
 L – индуктивность реактора.

Такое последовательное соединение емкости и нелинейной индуктивности способно воздать все условия для формирования феррорезонансного контура при замыкании фазы на корпус [2]. Схема контура приведена на рис. 2.

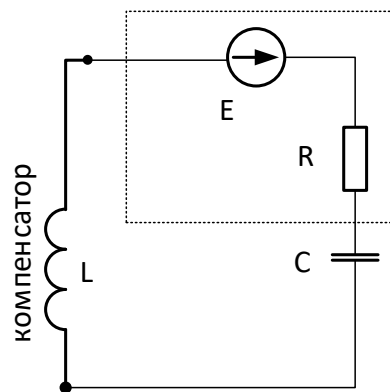


Рис. 2. Схема феррорезонансного контура
 E – ЭДС поврежденной фазы; R – активное сопротивление контура.

Опасность феррорезонансных процессов обычно обусловлена следующими сопровождающими их явлениями [3-5]:

- резкое увеличение токов в месте замыкания и через реактор;
- формирование перенапряжений на изоляции неповрежденных фаз;
- нарушения в работе защитных устройств;
- перегрев электрооборудования;
- повреждение электрооборудования;
- пробой изоляции;
- возникновение высших гармоник а также субгармоник в электросети.

Для устранения возможности возникновения этих опасных явлений необходимо исследовать причины феррорезонансных процессов и влияющие на них факторы.

2. Исследование феррорезонансного контура

При исследовании феррорезонансных процессов особое внимание следует уделять точности описания элементов рассматриваемой схемы [6]. Вводимые допущения в различных методах, могут привести не только к появлению погрешности вычислений, но и к неверной оценке характера процессов в феррорезонансном контуре. Методы анализа феррорезонансных процессов могут быть сгруппированы следующим образом:

- 1) графоаналитические методы [7-9];
- 2) методы на основе аналитического решения дифференциального уравнения [3, 10];
- 3) численные методы решения дифференциального уравнения.

Первая группа методов основана на построении вольтамперных характеристик феррорезонансного контура, по которым определяются точки равновесных состояний системы. В [7] отмечается, что при ряде условий этот подход позволяет обеспечить достаточную точность результатов. Кроме того, графоаналитические методы удобны для анализа влияния параметров контура на протекающие процессы.

Согласно второму подходу, описание нелинейного элемента осуществляется, как правило, на основе полинома. При использовании полинома третьей степени уравнение, описывающее переходный процесс в феррорезонансном контуре может быть сведено к уравнению Дуффинга [3]. В [10] представлена методика достаточно точного определения точек неустойчивого равновесия системы. Однако, использование этих подходов требует ряда упрощений на различных этапах расчетов, в результате чего они не всегда могут применяться для исследования влияния различных факторов на возможность возникновения феррорезонанса.

Численные методы позволяют получить частные решения и могут быть использованы для оценки эффективности предлагаемого метода управления феррорезонансным контуром на завершающем этапе исследования.

Проведенный анализ методов расчетов феррорезонансных процессов позволил предложить комплексный подход их исследований, реализованный в соответствии со следующими этапами:

- 1) по экспериментально определенным значениям тока и напряжения построены вольт-амперные характеристики элементов контура;
- 2) на основе графоаналитического метода проведена оценка количества точек равновесия и соответствующие им значения токов и напряжений;
- 3) на основе анализа переходных процессов в феррорезонансном контуре предложен способ их устранения;
- 4) при помощи вычислительного эксперимента воспроизведены процессы в феррорезонансном контуре и оценена эффективность предложенного метода управления им.

Численные эксперименты проведены на при помощи модели, представленной на рис. 3.

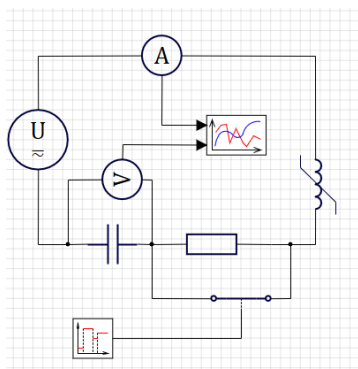


Рис. 3. Модель феррорезонансного контура

В модели использована кусочно-линейная аппроксимация нелинейной характеристики реактора. На рис. 4 результаты расчета сопоставлены с экспериментальными результатами измерений тока и напряжения на емкостном элементе.

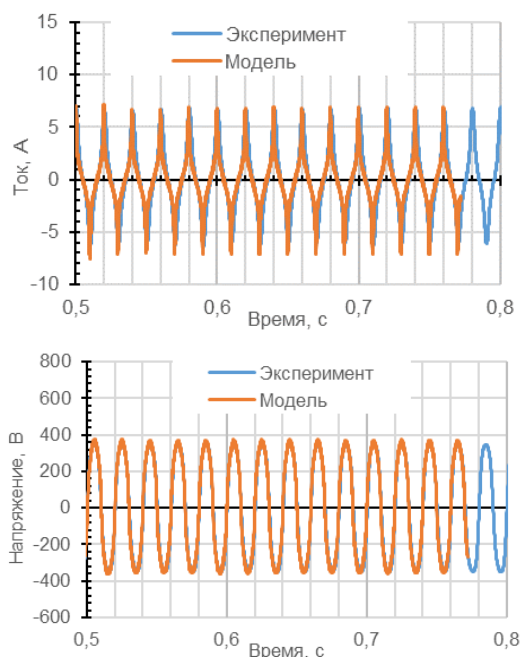


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные осциллограммы тока и напряжения в режиме устойчивого феррорезонанса

В рассматриваемом контуре имеется два устойчивого состояния. Возможность перехода системы после включения контура в одно из них определяется начальными условиями, сформировавшимися перед его образованием. Первое устойчивое состояние контура – нерезонансное. В этом состоянии наибольшее значение тока составляло величину 1.15 А, а его форма близка к синусоидальной. Спектральные составы тока в двух устойчивых состояниях приведены на рис. 5.

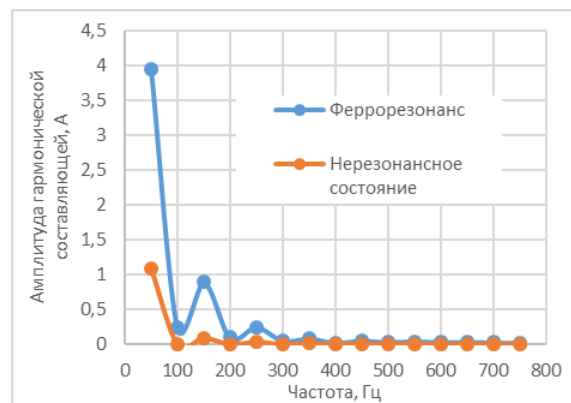


Рис. 5. Спектральные составы токов феррорезонансного контура

При возникновении устойчивого феррорезонанса в этом же контуре величина тока увеличивалась до значения, превышающего 5 А. При этом, как видно из рис. 5, переход в это состояние сопровождается увеличением основной, а также третьей, пятой и седьмой гармоник тока.

3. Метод управления феррорезонансным контуром

Метод предназначен для управления феррорезонансным контуром, обладающим тремя точками равновесия. Ниже, на рис. 6, представлены вольтамперные характеристики элементов такого контура.

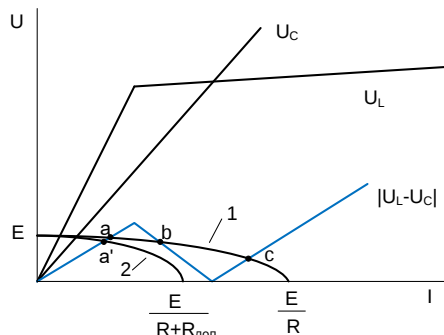


Рис. 6. Вольтамперные характеристики элементов феррорезонансного контура

U_C – напряжение на разделительной емкости; U_L – напряжение на нелинейном реакторе; 1 и 2 – внешние характеристики активного двухполюсника, образованного ЭДС поврежденной фазы и активным сопротивлением контура.

Как видно из рис. 6, контур имеет три точки равновесия: a – точка устойчивого равновесия, соответствующая линейной части характеристики реактора (нерезонансное состояние); b – точка неустойчивого равновесия; c – точка устойчивого равновесия, соответствующая феррорезонансу. Возникновение в описываемой системе устойчивого феррорезонанса возможно в результате переходных процессов при достаточных начальных условиях. Такие условия могут быть сформированы при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна в предшествующих циклах коммутаций (например, зажигание и последующее гашение заземляющей дуги), а также в результате несимметрии фазных емкостей. Выход системы из состояния устойчивого феррорезонанса без изменения ее параметров невозможен.

Для предотвращения феррорезонансных процессов предлагается ввести на непродолжительное время в контур дополнительное сопротивление. Это приведет к тому, что внешняя характеристика активного двухполюсника изменится с вида, соответствующего линии 1, на вид, соответствующей линии 2 на рис. 6. Кривая 2 имеет только одну точку пересечения с эквивалентной вольтамперной характеристикой реактивных элементов $|U_L - U_C|$. В результате система перейдет в состояние, соответствующее точке a' .

Одновременно с этим при помощи вводимого сопротивления осуществляется рассеивание энергии колебаний в контуре. После вывода из состава цепи дополнительного сопротивления начальные условия переходных процессов оказываются недостаточными для возобновления феррорезонанса. Это приводит контур в устойчивое состояние, соответствующее точке a .

Вводимое дополнительное сопротивление необходимо подобрать таким образом, чтобы

минимизировать необходимое время его подключения. Это обусловлено тем, что ввод дополнительного активного сопротивления увеличивает некомпенсируемую активную составляющую в токе замыкания. Минимизировать время подключения можно, обеспечив наибольшую мощность рассеивания на вводимом резисторе. Зависимость мощности тепловыделений от сопротивления дополнительного резистора описывается следующим выражением.

$$P = \frac{E^2 R_{\text{доп}}}{(R_{\text{доп}} + R)^2 + X^2}, \quad (1)$$

где E – ЭДС контура; $R_{\text{доп}}$ – вводимое в контур активное сопротивление; R – активное сопротивление контура до ввода дополнительного сопротивления; X – реактивное сопротивление контура.

Влияние величины сопротивления на мощность графически представлено на рис. 7. Как видно из рисунка эта зависимость обладает экстремумом, что подтверждается численными экспериментами при помощи модели, изображенной на рис. 3. При значительных отклонениях от точки, соответствующей максимуму мощности, величины дополнительного сопротивления как в область больших значений, так и в область меньших значений нарушается эффективность метода управления. Это выражается в возобновлении феррорезонанса после вывода дополнительного сопротивления.

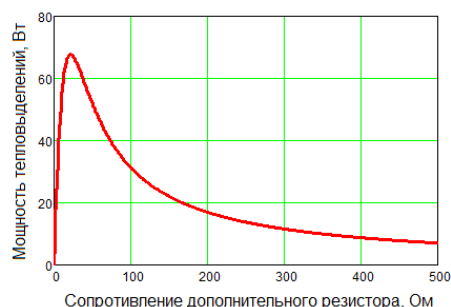


Рис. 7. Зависимость мощности тепловыделений на дополнительном резисторе от его сопротивления

Экспериментально эффективность предложенного метода была проверена при помощи установки, схема которой представлена на рис. 8.

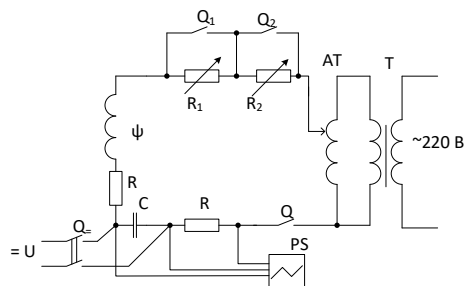


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

В ходе экспериментов осциллографом PS регистрировались изменения тока контура при помощи измерительного шунта R и напряжение на емкостном элементе. Формирование контура

осуществлялось замыканием контакта Q . Начальные условия переходных процессов создавались за счет предварительного заряда емкости C от источника постоянного напряжения (включение с последующим отключением Q_1), а также путем ввода в цепь (размыкание с последующим замыканием контакта Q) реостата R_1 с сопротивлением, изменяющимся в пределах до 1 кОм. Дополнительное сопротивление R_2 вводилось в контур после возникновения феррорезонансных процессов. На рис. 9 представлены полученные таким образом осциллограммы.

Как видно из рис. 9, предварительно перед замыканием Q в момент t_1 емкость была заряжена до необходимого значения напряжения. Это привело к возникновению феррорезонансных процессов после включения контура на переменное напряжение. В момент t_2 был отключен Q_2 , тем самым в контур было введено дополнительное сопротивление R_2 . Это привело к снижению тока контура и напряжению на емкости.

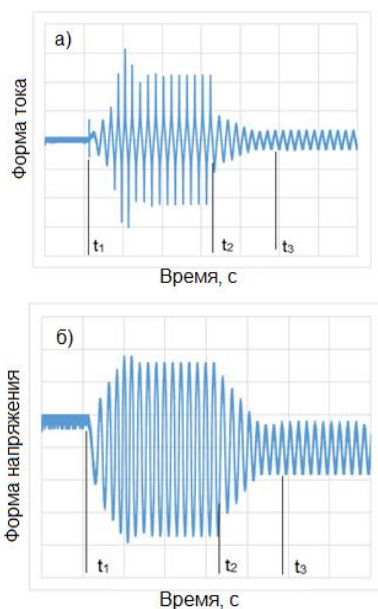


Рис. 9. Формы экспериментальных осциллограмм тока и напряжения при управлении феррорезонансным контуром

а) ток феррорезонансного контура; б) напряжение на емкостной элементе

На рис. 9 видно, что через пять периодов колебаний после ввода дополнительного активного сопротивления амплитуды тока и напряжения снизились до значений, соответствующих точке a' на вольтамперной характеристике (рис. 6). Через еще два периода, в момент t_3 , произошло шунтирование R_2 контактом Q_2 . В результате система перешла в устойчивое состояние, соответствующее точке a . При этом амплитуды тока контура и напряжения емкости несколько увеличились. Тем самым был устранен феррорезонансный процесс.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили предложить метод управления феррорезонансным контуром, основанный на временном вводе активного сопротивления в цепь дугогасящего реактора. Установлено, что эффективность предложенного способа определяется величиной вводимого сопротивления и предложен подход к определению его значения.

Эффективность предложенного метода проверена на физической модели феррорезонансного контура, где продемонстрировано влияние сопротивления на развитие процессов.

Преимущество такого способа заключается в снижении времени работы контура в режиме с увеличенным активным сопротивлением, что позволяет за минимальное время обеспечить необходимые форму и величину тока реактора. Тем самым устраняются возможные опасности, связанные с внедрением и реализацией устройств заземления нейтрали в низковольтных судовых электрических сетях.

Литература

1. Благинин В. А., Кажекин И. Е. Варианты защиты судовых электросистем от однофазных замыканий. Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3. С. 23-30.
2. Кажекин И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью. Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 4, № 4 (46). С. 83-87.
3. Кажекин, И.Е. Формирование максимальных перенапряжений при возникновении феррорезонансных процессов во время дуговых однофазных замыканий в низковольтных судовых электросистемах. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. -2020. № 1. С. 115-124.
4. Valverde, V & Mazon, A.J. & Zamora, I & Buigues, G. (2011). Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. Renewable Energy and Power Quality Journal. 1. 10.24084/repqj05.317.
5. Marti, Jose & Soudack, A.C.. (1991). Ferroresonance in Power Systems: Fundamental Solutions. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C. 138. 321 - 329. 10.1049/ip-c.1991.0040.
6. Jacobson, D.A.N.. (2003). Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Conference Proceedings. 2. 1212 Vol. 2. 10.1109/PES.2003.1270499.

7. Кутявин, А.И. Расчет релейных эффектов в последовательной феррорезонансной цепи. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 1972. №244. С. 39-43.
8. Халилов, Ф.Х. Перенапряжения в сети 6-35 кВ. М.: «Энергоатомиздат». 1989, 192 с.
9. Поливанов, К.М. Определение устойчивости точек равновесия при феррорезонансе. Известия ВУЗов: Электромеханика. 1965. № 11. С. 1193-1196
10. Iravani, Reza & Chaudhary, A.K.S. & Giesbrecht, W.J. & Hassan, Ifrah & Keri, Albert & Lee, Kwan & Martinez, J.A. & Morched, A.S. & Mork, Bruce & Parniani, Mostafa & Sharshar, A. & Shirmohammadi, Davood & Walling, Reigh & Woodford, Dennis. (2000). Modeling and analysis guidelines for slow transients - Part III: The study of ferroresonance. Power Delivery, IEEE Transactions on. 15. 255 - 265. 10.1109/61.847260.

References

1. Blagin V. A., Kazhekin I. E. Varianty zashchity sudovykh jelektrosistem ot odnofaznykh zamykanij. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti [Options for protecting ship electrical systems from single-phase short circuits.]. 2010. № 3. S. 23-30.
2. Kazhekin I.E. Opisaniye processov pri dugovykh odnofaznykh zamykaniyakh v nizkovol'tnykh sudovykh jelektrosetyakh s kompensirovannoy nejtral'yu [Description of processes in case of single-phase arc faults in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral]. Morskije intellektual'nye tehnologii. 2019. T. 4, № 4 (46). S. 83-87.
3. Kazhekin, I.E. Formirovaniye maksimal'nykh perenaprjazhenij pri vozniknovenii ferrozonansnykh processov vo vremya dugovykh odnofaznykh zamykanij v nizkovol'tnykh sudovykh jelektrosistemakh [Formation of maximum overvoltages in the event of ferroresonance processes during single-phase arc faults in low-voltage ship electrical systems]. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: Morskaja tehnika i tehnologija. -2020. № 1. S. 115-124.
4. Valverde, V & Mazon, A.J. & Zamora, I & Buigues, G. (2011). Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. Renewable Energy and Power Quality Journal. 1. 10.24084/repqj05.317.
5. Marti, Jose & Soudack, A.C.. (1991). Ferroresonance in Power Systems: Fundamental Solutions. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C. 138. 321 - 329. 10.1049/ip-c.1991.0040.
6. Jacobson, D.A.N.. (2003). Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Conference Proceedings. 2. 1212 Vol. 2. 10.1109/PES.2003.1270499.
7. Kutjavin, A.I. Raschet relejnykh jeffektov v posledovatel'noj ferrozonansnoj cepi [Calculation of relay effects in a series ferroresonant circuit]. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 1972. №244. S. 39-43.
8. Halilov, F.H. Perenaprjazhenija v seti 6-35 kV [Overvoltage in the network 6-35 kV]. М.: «Jenergoatomizdat». 1989, 192 с.
9. Polivanov, K.M. Opredelenie ustojchivosti toček ravnovesija pri ferrozonanse [Determination of the stability of equilibrium points at ferroresonance]. Izvestija VUZov: Jelektromehanika. 1965. № 11. S. 1193-1196
10. Iravani, Reza & Chaudhary, A.K.S. & Giesbrecht, W.J. & Hassan, Ifrah & Keri, Albert & Lee, Kwan & Martinez, J.A. & Morched, A.S. & Mork, Bruce & Parniani, Mostafa & Sharshar, A. & Shirmohammadi, Davood & Walling, Reigh & Woodford, Dennis. (2000). Modeling and analysis guidelines for slow transients - Part III: The study of ferroresonance. Power Delivery, IEEE Transactions on. 15. 255 - 265. 10.1109/61.847260.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Евгеньевич Кажекин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Ilya E. Kazhekin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.064.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.064>**Рекомендации по повышению эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода**В.Ф. Белей¹ vbeley@klgtu.ru, К.В. Коротких¹ kirill-korotkikh@bk.ru.¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Основной круг вопросов, составляющих содержание данной работы: рассмотрение структуры трансформаторного парка, системы электроснабжения судостроительного завода; результаты исследований, оценка и предложения по повышению эффективности трансформаторного парка завода. Электроснабжение судостроительного завода осуществляется от сети 110 кВ региональной энергосистемы через трансформаторную подстанцию 110/6 кВ. От шин 6 кВ подстанции 110/6 кВ через кабельные линии осуществляется электроснабжение цеховых трансформаторных подстанций напряжением 6/0,4 кВ. Таким образом, распределительные трансформаторы мощностью до 1600 кВА напряжением 6/0,4 кВ являются связующим звеном между электроприемниками и энергосистемой. Поэтому от эффективности работы этих трансформаторов во многом зависит качество электроэнергии у приемников электроэнергии, эффективность работы системы электроснабжения. Следует отметить старый трансформаторный парк системы электроснабжения судостроительного завода: 61,5 % работают более 40 лет; 11% - от 30 до 40 лет, оставшиеся - менее 5 лет. Новые трансформаторы, производимые трансформаторными заводами, по энергетическим характеристикам несущественно отличаются от производимых десятилетия ранее. В составе электроприемников завода значительную долю составляют искажающие нагрузки: сварочные аппараты, электротермические установки и гальванические ванны, светодиодные лампы и прочее, приводящие к искажению и несимметрии фазных напряжений. Показано, что использование трансформаторов со схемой соединения обмоток Δ/Y_0 обеспечивает коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности на шинах цеховой подстанции 0,4 кВ согласно ГОСТ. Кардинальным решением по повышению энергоэффективности распределительных трансформаторов является их замена энергосберегающими на основе аморфных сплавов. Потери холостого хода трансформаторов на основе аморфных сплавов в восемь раз меньше, чем у трансформаторов с магнитопроводом на основе электротехнической стали, потери в обмотках - в два раза меньше. Снижение потерь энергии в трансформаторах на аморфных сплавах также приводит к снижению его нагрева, что следует из рассмотрения уравнения теплового баланса трансформатора. Цены на трансформаторы из аморфных сплавов значительно выше, чем на трансформаторы из электротехнической стали, поэтому производители вводят показатель «Минимизированная стоимость», складываемая из цены на данное электротехническое изделие и стоимости потерь электроэнергии в нём за нормативный срок его службы.

Ключевые слова: эффективность, трансформатор, система электроснабжения, качество электроэнергии, мощность, напряжение, ток.

Для цитирования: Белей В.Ф., Коротких К.В. Рекомендации по повышению эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 65—71.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.064>**Recommendations for improving the efficiency of the transformer park of a shipyard power supply system**Valeriy F. Beley¹ vbeley@klgtu.ru, Kirill V. Korotkikh¹ kirill-korotkikh@bk.ru.¹ Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The main range of issues that make up the content of this work: consideration of the structure of the transformer park, the power supply system of the shipyard; research results, evaluation and proposals for improving the efficiency of the plant's transformer fleet. The shipyard is supplied with electricity from the 110 kV network of the regional power system through a 110/6 kV transformer substation. From the 6 kV buses of the 110/6 kV substation, through cable lines, the workshop transformer substations are supplied with a voltage of 6/0.4 kV. Thus, distribution transformers with a power of up to 1600 kVA with a voltage of 6/0.4 kV are the link between power receivers and the power system. Therefore, the quality of electricity at power receivers, the efficiency of the power supply system largely depends on the efficiency of these transformers. It should be noted the old transformer fleet of the shipyard's power supply system: 61.5% have been operating for more than 40 years; 11% - from 30 to 40 years, the rest - less than 5 years. New transformers produced by transformer plants differ little in terms of energy characteristics from those produced decades earlier. Distorting loads account for a significant proportion of the plant's electrical receivers: welding machines, electrothermal installations and galvanic baths, LED lamps, etc., leading to distortion and asymmetry of phase voltages. It is shown that the use of transformers with a winding connection scheme Δ/Y_0 provides a zero-sequence voltage unbalance factor on the buses of a shop substation 0.4 kV according to GOST. The cardinal solution

to improve the energy efficiency of distribution transformers is to replace them with energy-saving ones based on amorphous alloys. The no-load losses of transformers based on amorphous alloys are eight times less than those of transformers with a magnetic core based on electrical steel, the losses in the windings are two times less. Reducing energy losses in transformers based on amorphous alloys also leads to a decrease in its heating, which follows from the consideration of the heat balance equation of the transformer. Prices for transformers made of amorphous alloys are much higher than for transformers made of electrical steel, so manufacturers introduce the "Minimized cost" indicator, which is made up of the price of a given electrical product and the cost of electricity losses in it over its standard service life.

Keywords: efficiency, transformer, power supply system, power quality, power, voltage, current.

For citation: Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh, Recommendations for improving the efficiency of the transformer park of a shipyard power supply system, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 65—71.

Введение

Распределительные трансформаторы мощностью до 6300 кВА напряжением 6-35/0,4 кВ, как правило, являются связующим звеном между электроприемниками и энергосистемой. На их долю приходится порядка 88% от всего трансформаторного парка России. Поэтому от эффективности работы этих трансформаторов во многом зависит качество электроэнергии у приемников электроэнергии. Следует отметить, что в системах электроснабжения используются устаревший трансформаторный парк. Новые трансформаторы, производимые трансформаторными заводами, по энергетическим характеристикам незначительно отличаются от производимых десятилетия ранее. Кардинальным решением по повышению энергоэффективности распределительных трансформаторов является их замена энергосберегающими на основе аморфных сплавов.

1. Структура трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода

Электроснабжение судостроительного завода осуществляется от сети 110 кВ региональной энергосистемы (рис. 1) через трансформаторную подстанцию 110/6 кВ (трансформаторы T1 и T2, мощностью 25 МВА каждый).

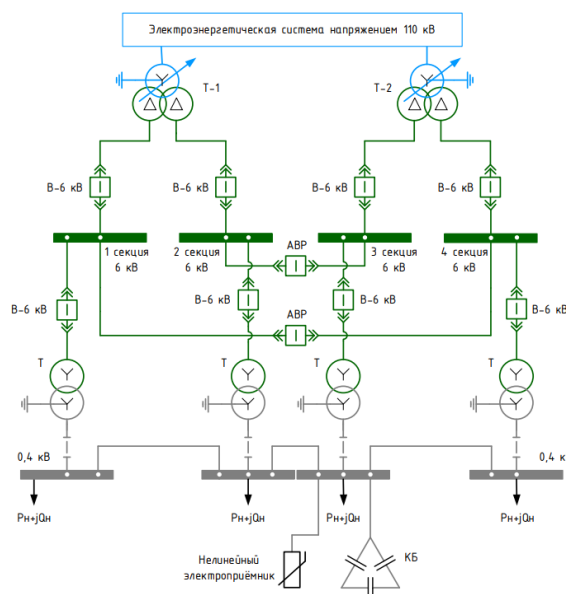


Рис. 1. Система электроснабжения судостроительного завода

Далее от шин 6 кВ подстанции 110/6 кВ через кабельные линии осуществляется электро-

снабжение цеховых трансформаторных подстанций напряжением 6/0,4 кВ (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Распределение трансформаторов цеховых подстанций судостроительного завода по мощности

S _{ном} , кВА	1600	1000	630	560	400	320
Доля, %	23	21	42	4	8	2

Таблица 2

Технические данные трансформаторов цеховых подстанций судостроительного завода

Тип	S _{ном} , кВА	P ₀ , кВт	P _к , кВт	I _к , %	Схема соединения обмоток
ТМ-400	400	0,95	5,5	2,1	Y/Y ₀
ТМ-630	630	1,31	7,6	2,0	Y/Y ₀ Δ/Y ₀
ТМ-1000	1000	1,6	10,8	1,2	Y/Y ₀ Δ/Y ₀
ТМ-1600	1600	1,95	16,5	1,0	Y/Y ₀ Δ/Y ₀

Следует отметить устаревший трансформаторный парк системы электроснабжения судостроительного завода: 61,5 % трансформаторов находятся в эксплуатации более 45 лет; 11% - от 35 до 45 лет, оставшиеся - менее 10 лет.

2. Результаты исследования эффективности трансформаторного парка системы электроснабжения судостроительного завода

Потери в трансформаторах определяются по выражению 1 [1, 2].

$$\Delta P = P_{xx} \cdot k + \beta^2 \cdot P_k \quad (1)$$

где: β – коэффициент нагрузки трансформатора;

$(\beta^2 \cdot P_k)$ – потери в обмотках;

P_{xx} – потери холостого хода;

k – коэффициент увеличения потерь холостого хода в зависимости от срока эксплуатации трансформатора.

Рост потерь холостого хода обусловлен ухудшением диэлектрических свойств изоляции обмоток и выводов; трансформаторного масла; увеличением расстояния между листами электротехнической стали и другое (рис. 2) [2].

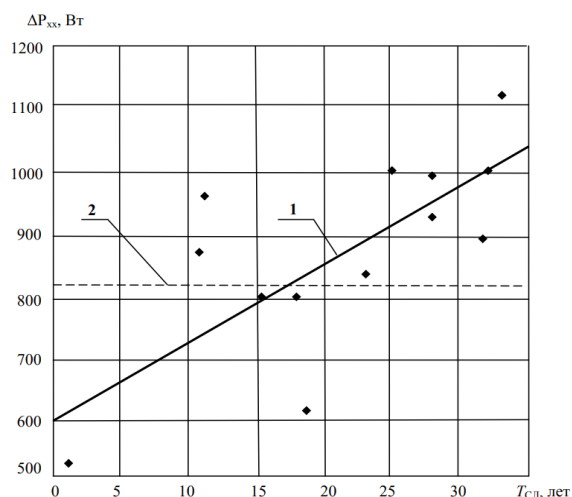


Рис. 2. Зависимость изменения потерь холостого хода трансформаторов типа ТМ 50/10 Шуйской городской электрической сети от срока эксплуатации: 1 – линейная зависимость; 2 – паспортная мощность потерь холостого хода

В России только ПАО «Россети», установила категории уровня максимальных потерь холостого хода и короткого замыкания в трансформаторах, связав его с классом эффективности трансформатора (табл. 3 и 4) [3].

Таблица 3

Уровень максимальных потерь холостого хода трансформаторов напряжением 6-10 кВ

Мощность трансформатора, МВА	Потери холостого хода, кВт			
	Класс эффективности			
	X1	X2	X3	X4
0,063	0,175	0,16	0,128	0,104
0,1	0,26	0,217	0,18	0,145
0,16	0,375	0,3	0,26	0,21

Продолжение таблицы 3

Мощность трансформатора, МВА	Потери холостого хода, кВт			
	Класс энергоэффективности			
	X1	X2	X3	X4
0,25	0,52	0,425	0,36	0,3
0,4	0,75	0,565	0,52	0,43
0,63	1	0,696	0,73	0,56
1	1,4	0,957	0,94	0,77
1,25	1,5	1,35	1,15	0,95
1,6	1,95	1,478	1,45	1,2
2,5	2,6	2,13	2,1	1,75

Таблица 4

Уровень максимальных потерь короткого замыкания трансформаторов напряжением 6-10 кВ

Мощность трансформатора, МВА	Потери короткого замыкания, кВт		
	Класс эффективности		
	K1	K2	K3
0,063	1,28	1,27	1,031
0,1	1,97	1,591	1,475
0,16	2,9	2,136	2
0,25	3,7	2,955	2,75
0,4	5,4	4,182	3,85
0,63	7,6	6,136	5,6
1	10,6	9,545	9
1,25	13,5	13,25	11
1,6	16,5	15,455	14
2,5	26,5	23,182	22

Ни один из трансформаторов системы электропитания судостроительного завода не соответствует требованиям по классу энергоэффективности (табл. 3 и 4).

В составе электроприемников завода значительную долю составляют искажающие нагрузки: сварочные аппараты, электротермические установки, гальванические ванны, светодиодные лампы и прочее, приводящие к искажению и несимметрии фазных напряжений (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на шинах 0,4 кВ цеховой подстанции судостроительного завода

Показателями качества, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}).

Для указанных показателей качества электроэнергии установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой

последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) и несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}) в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю [4].

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{U0} , определяется по выражениям 2 и 3 [4].

$$U_{0(1)} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} - 3 \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{BA(1)}} \right]^2 + \left[\sqrt{4U_{CB(1)}^2 - \left(\frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_{B(1)}^2 - \left(\frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} \right]^2} \quad (2)$$

$$K_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где: U_0 – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты.

Следует отметить, что значительные искажения фазных напряжений имеют место на шинах 0,4 кВ цеховых подстанций с группой соединения обмоток трансформатора Y/Y₀.

Как известно [1], при несимметричной нагрузке несимметричная система напряжений, э.д.с. и токов раскладывается на три симметричные системы: прямой (U_1), обратной (U_2) и нулевой

последовательности (U_0). В трехфазном стержневом трансформаторе при несимметричной нагрузке имеют место магнитные потоки:

- 1) $\Phi_A^1, \Phi_B^1, \Phi_C^1$ – обусловленные токами прямой и обратной последовательностей;
- 2) Φ_0 – поток нулевой последовательности, обусловленный током нулевой последовательности (рис. 4) [1].

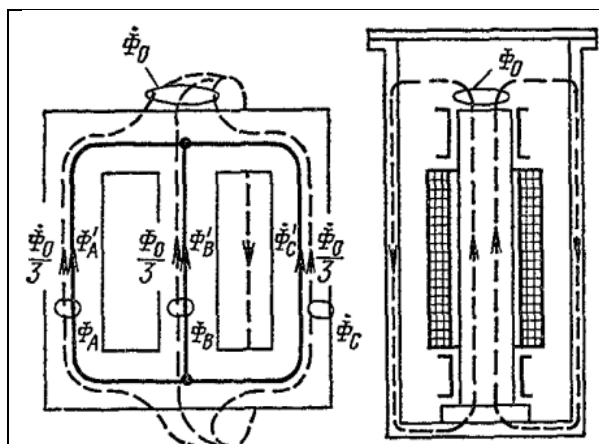


Рис. 4. Магнитное поле в трехфазном трехстержневом трансформаторе

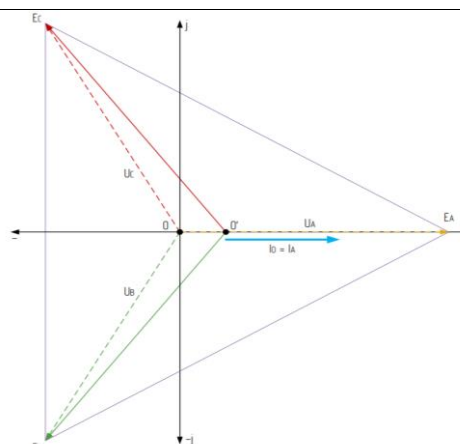


Рис. 5. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при наличии поля нулевой последовательности

При наличии в обмотках трансформатора токов нулевой последовательности справедлива система уравнений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{I}_{A\phi} \cdot Z_1 = -\underline{E}_A - \underline{E}_0 \\ \underline{U}_B &= \underline{I}_{B\phi} \cdot Z_1 = -\underline{E}_B - \underline{E}_0 \\ \underline{U}_C &= \underline{I}_{C\phi} \cdot Z_1 = -\underline{E}_C - \underline{E}_0 \end{aligned} \quad (4)$$

где: $\underline{E}_A, \underline{E}_B$ и $\underline{E}_C$ – э.д.с. наводимые трехфазным магнитным полем;

$\underline{E}_0$ – э.д.с. наводимая полем нулевой последовательности.

При соединении обмоток трансформатора во вторичной обмотке звезда с нулевым проводом:

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$$

$$I_{A\phi} + I_{B\phi} + I_{C\phi} = I_0 \quad (5)$$

Отсюда:

$$U_A + U_B + U_C = -3E_0 = -3I_0 \cdot Z_{0T} \quad (6)$$

где: $Z_{0T} = r_{0T} + jx_{0T}$ – полное сопротивление нулевой последовательности трансформатора (табл. 5).

Таблица 5
Сопротивления трансформатора типа ТМ, мощностью 630 кВА, напряжением 6/0,4 кВ

Параметр	Значение	
$S_{ном}, \text{кВА}$	630	
Схема соединения и группа	Y/Y_0	Δ/Y_0
Значения сопротивлений прямой последовательности, мОм	$r_{1T} = 3,1$	$r_{1T} = 3,3$
	$x_{1T} = 13,6$	$x_{1T} = 13,5$
Значения сопротивлений нулевой последовательности, мОм	$r_{0T} = 30,2$	$r_{0T} = 3,4$
	$x_{0T} = 95,8$	$x_{0T} = 13,5$

Таким образом, наибольшее значение при несимметричной нагрузке имеет место поле нулевой последовательности в трехфазном трехстержневом трансформаторе со схемой соединения обмоток звезда/звезда с нулевым проводом (табл. 5), так как ток нулевой последовательности протекает только во вторичной обмотке трансформатора. Магнитное поле, созданное этим током, не компенсируется полем со стороны первичной обмотки, так как на высокой стороне трансформатора нет возможности для протекания токов нулевой последовательности. На рисунке 5 приведена векторная диаграмма для трансформатора ТМ-630/6,3 при схеме соединения обмоток Y/Y_0 для случая, когда по вторичной обмотке протекает по фазе А номинальный ток, а в фазах В и С – ток отсутствует.

При соединении обмоток трансформатора по схеме треугольник/звезда с нулевым проводом в

первичной обмотке также имеет место ток нулевой последовательности, который создает встречное поле нулевой последовательности и результирующее поле значительно уменьшается, что приводит к значительному снижению Z_{0T} (табл. 4), E_0 и коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{U0}) [3].

Кардинальным решением по повышению энергоэффективности распределительных трансформаторов является их замена энергосберегающими на основе аморфных сплавов. В частности, фирма General Electric [5] более 15 лет производит трансформаторы с сердечником из аморфных сплавов (табл. 6).

Таблица 6
Технические данные трансформаторов ТМ-25 и фирмы "General Electric" аналогичной мощности и напряжения ($S_n = 25 \text{ кВА}$, напряжением 10/0,4 кВ)

Марка	$P_0, \text{кВт}$	$P_K, \text{кВт}$	$I_0, \%$	$u_K, \%$
ТМ-25	0,13	0,6	3,2	4,5
"General Electric"	0,016	0,32	0,14	2,45

Как следует из данных (табл. 6), использование трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов, а также из-за увеличения сечения первичной и вторичной обмоток, позволило снизить потери холостого хода в трансформаторе более чем в 8 раз, потери в меди – в 2 раза, по сравнению с потерями в трансформаторах старых образцов. Практически исключается эмиссия в электрическую сеть высших гармоник тока.

В настоящее время ведущими фирмами мира продолжается разработка трансформаторов из аморфных сплавов мощностью более 2,5 МВА [6].

В России и мире продолжают работы по снижению потерь в аморфных сплавах [6]. В работе [6] дано сравнение технических характеристик материалов магнитопровода распределительных трансформаторов на основе электротехнической стали и аморфных сплавов (рис. 6, табл. 7).

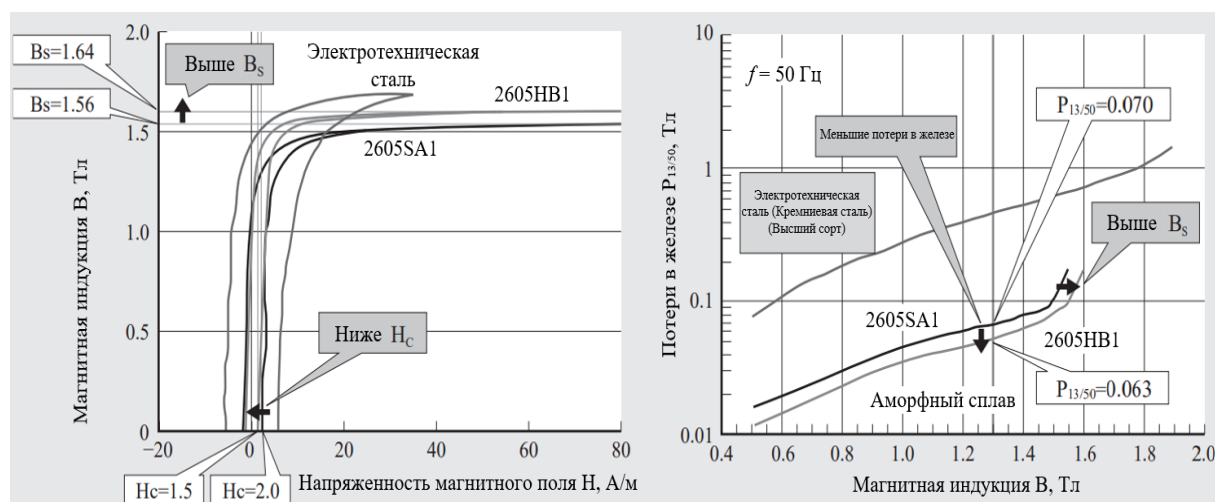


Рис. 6. Характеристики электротехнической стали и двух аморфных сплавов (2605SA1 и 2605HB1)

Таблица 7

Сравнение материалов из электротехнической стали и двух аморфных сплавов (2605SA1 и 2605HB1)

Параметр	Значение			Примечания
	Текстурированная электротехническая сталь	Аморфный сплав (2605SA1)	Аморфный сплав (2605HB1)	
Магнитная индукция (насыщение) B_s , Тл	2,03	1,5	1,6	Более высокие значения допускают меньший размер
Коэрцитивная сила H_c , А/м	35,0	2,0	1,5	Более низкие значения приводят к меньшим потерям
Удельное электрическое сопротивление ρ , мОм·м	0,5	1,3	1,3	Более высокие значения приводят к меньшим потерям
Потери в железе P , Вт/кг	0,44	0,07	0,06	Более низкие значения приводят к меньшим потерям
Магнитострикция λ , 10^{-6}	-1	27	27	Более низкие значения приводят к меньшему шуму
Толщина листа t , мм	0,23	0,025	0,025	При большей толщине листа, облегчается работа трансформатора
Коэффициент ламинирования SF , %	>95	>84	>84	Более высокие значения допускают меньший размер

Цена на трансформаторы из аморфных сплавов значительно выше трансформаторов из электротехнической стали, поэтому производители вводят показатель «Минимизированная стоимость», складываемая из цены на данное электротехническое изделие и стоимости потерь электроэнергии в нём за нормативный срок его работы [5]. Снижение потерь энергии в трансформаторах на аморфных сплавах способствует снижению его нагрева, что следует из уравнения теплового баланса для трансформатора:

$$\Delta P \cdot dt = C \cdot d\theta + A \cdot \theta \cdot dt \quad (7)$$

где: ΔP – сумма потерь электроэнергии в трансформаторе;
 C – теплоемкость трансформатора;
 A – теплоотдача трансформатора.

$$\theta_{уст} = \frac{\Delta P}{A} \quad (8)$$

где: $\theta_{уст}$ – установившееся значение превышения температуры трансформатора над окружающей средой.

Одной из перспективных областей применения трансформаторов на аморфных сплавах являются возобновляемые источники энергии, от которых электрическая энергия передается в энергосистему [5]. Это обусловлено стремлением производителей ветроустановок минимизировать потери на собственные нужды и обеспечить качество электроэнергии в электрических сетях в соответствии с ГОСТ 32144–2013.

Заключение

В работе показана структура трансформаторного парка судостроительного завода. Используемые на заводе силовые трансформаторы морально устарели и не соответствуют требованиям по классу энергоэффективности. Показано, что использование трансформаторов со схемой соединения обмоток Δ/Y_0 обеспечивает коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности на шинах цеховой подстанции 0,4 кВ согласно ГОСТ. Кардинальным решением по повышению энергоэффективности распределительных трансформаторов является их замена энергосберегающими на основе аморфных сплавов.

Литература

- Петров Г. Н. Электрические машины. В 3 томах. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974, 240 с.
- Грачева Е.И. Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях// Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыров Р.Р. - Проблемы энергетики, 2016, № 1-2. С 53-63.
- Ивакин В. Н. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов/ Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Магницкий А.А.// Энергия единой сети. Москва, 2017, №5(34), 21-31 с.
- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014, 19 с.

5. Энергосберегающие технологии в системах электроснабжения: учебное пособие для вузов / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин, В. Ф. Паршина, Л. Д. Шабалин. Под. ред. В. Ф. Белей. Калининград: Издательство КГТУ, 2021, 98 с.
6. Аморфные трансформаторы. Hitachi review. Том 60, 2011. - № 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hitachi.com/rev/archive/2011/index.html> (Дата обращения 19.06.2021).

References

1. Petrov G. N. Elektricheskiye mashiny. V 3 tomakh. CH.1. Vvedeniye. Transformatory [Electrical machines. In 3 volumes. Part 1. Introduction. Transformers]. Moscow: Energy Publ., 1974, 240 p.
2. Gracheva E.I. Uchet poter' kholostogo khoda transformatorov v period ekspluatatsii pri raschete poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh [Accounting for no-load losses of transformers during operation when calculating electricity losses in distribution networks]. Problems of Energy, 2016, no 1-2. 53-63 p.
3. Ivakin V. N. Normirovaniye energoeffektivnosti raspredelitel'nykh transformatorov [Rationing of the energy efficiency of distribution transformers] Energy of a single network. Moscow, 2017, no. 5(34), 21-31 p.
4. State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 19 p. (In Russian).
5. Beley V.F., Nikishin A.Yu., Parshina V.F., Shabalin L.D. Energosberegayushchiye tekhnologii v sistemakh elektrosnabzheniya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Energy-saving technologies in power supply systems: a textbook for universities]. Beley V.F. ed. Kaliningrad, KSTU Publishing House, 2021, 98 p.
6. Amorphous transformers. Hitachi review. Volume 60, 2011. - no. 5 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.hitachi.com/rev/archive/2011/index.html> (Accessed 06.19.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белей Валерий Феодосиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley, Dr.Sci.(Eng), professor, head of the Department of energy, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Кирилл Викторович Коротких, аспирант кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kirillkorotkikh@bk.ru

Kirill V. Korotkikh, PhD student of the Energy Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: kirillkorotkikh@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.09.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.10.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.10.2022.

Научная статья

УДК 539.1.08; 621.892.84

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.065>

Исследование судовых моторных масел с продуктами износа оптическими методами

И.П. Корнева¹ zxc127@rambler.ru, Н.Я. Синявский¹ n_sinyavsky@mail.ru,
Н.А. Кострикова¹ natalia.kostrikova@klgtu.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация В данной статье исследована возможность использования методов оптической поглощательной спектроскопии и флуоресценции для регистрации продуктов износа в отработанных моторных маслах судовых двигателей. Настоящая задача является актуальной для диагностики состояния морской техники.

Целью работы явилась разработка метода обнаружения и определения концентрации ферромагнитных частиц продуктов износа в отработанном моторном масле путем анализа изменений спектров оптической плотности в зависимости от длины волны при помещении образца во внешнее магнитное поле.

Полученные результаты обладают новизной. Описывается предполагаемый механизм увеличения прозрачности отработанных масел в магнитном поле. Показана возможность определения концентрации магнитных частиц, а значит и степени износа узлов двигателя в процессе эксплуатации.

Приводятся результаты исследования спектров флуоресценции свежих и отработанных моторных масел, анализируются изменения амплитуды и сдвига спектров, содержащих продукты износа. Результаты, приводимые в работе, повторялись при многократном проведении экспериментов, корректно обработаны современными математическими методами, обладают надежностью и достоверностью.

Ключевые слова: продукты износа в отработанных судовых маслах, оптическая абсорбция в магнитном поле, флуоресценция

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству (номер проекта 01–25–06.1).

Для цитирования Корнева И.П., Синявский Н.Я., Кострикова Н.А. Исследование судовых моторных масел с продуктами износа оптическими методами, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 72—78.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.065>

Study of marine motor oils with wear products by optical methods

Irina P. Korneva¹ zxc127@rambler.ru, Nikolai Ya. Sinyavsky¹ n_sinyavsky@mail.ru,
Natalya A. Kostrikova¹ natalia.kostrikova@klgtu.ru¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. This article explores the possibility of using optical absorption spectroscopy and fluorescence to detect wear products in used motor oils of marine engines. This task is relevant for diagnosing the state of marine equipment.

The aim of the work was to develop a method for detecting and determining the concentration of ferromagnetic particles of wear products in used engine oil by analyzing changes in the optical density spectra depending on the wavelength when the sample is placed in an external magnetic field.

The results obtained are novel. The expected mechanism for increasing the transparency of used oils in a magnetic field is described. The possibility of determining the concentration of magnetic particles, and hence the degree of wear of engine components during operation, is shown.

The results of a study of the fluorescence spectra of fresh and used motor oils are presented, and changes in the amplitude and shift of the spectra of oils containing wear products are analyzed. The results presented in the work were repeated during the reproduction of experiments, correctly processed by modern mathematical methods, and are reliable.

Key words: wear products in used marine oils, optical absorption in a magnetic field, fluorescence

Financial Support: The study was carried out within the framework of the state task of the Federal Agency for Fisheries (project number 01–25–06.1).

For citation: Korneva I.P., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N.A. Study of marine motor oils with wear products by optical methods, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 72—78.

Введение

Моторное масло является важным источником информации для раннего обнаружения отказов двигателя, так как его состояние отражает работоспособность агрегата и его компонентов. Чрезмерное загрязнение металлическими частицами

системы циркуляции моторного масла часто указывает на необычный износ двигателя и может привести к его перегреву и отказу. Основная функция масла заключается в создании непрерывного пленочного слоя между поверхностями, находящимися в относительном движении, чтобы уменьшить трение и предотвратить износ. Вторичная

функция заключается в охлаждении трущихся деталей, предотвращении коррозии металлических поверхностей, смывании или предотвращении проникновения загрязняющих веществ и поддержании достаточной чистоты сопрягаемых компонентов. Изменение физических, химических, электрических и оптических свойств изменяют характеристики моторного масла, что приводит к ухудшению его защитных свойств. Причинами деградации смазочного материала являются окисление, загрязнение частицами износа и сажи, попадание воды. Отсутствие достаточной диагностической информации может привести к внезапной неисправности, которая потребует отключения оборудования, его доставку в ремонтные мастерские, разборку и ремонт. На это потребуются время и материальные затраты. За прошедшие годы разработано множество методов (реологические, электрические, магнитные, оптические, химические и пр.) для контроля одного или нескольких рабочих параметров, чтобы эффективно контролировать состояние масла.

Моторное масло при работе двигателя подвергается множеству физических и химических процессов, в результате чего меняются его свойства [1]. Износ деталей двигателя связан с изменением основных физико-химических свойств масел и эта связь описывается во многих публикациях. Так, в работе [2] приводится обзор способов мониторинга характеристик моторных масел, методов диагностики и прогнозирования. Перспективным является создание систем диагностики судового масла посредством онлайн-анализа, а также разработка интеллектуальных сенсорных систем [3]. В справочнике [4] приведен большой ряд способов диагностики масла при эксплуатации двигателя. Исследованию судовых моторных масел методом динамического рассеяния света посвящена наша работа [5]. Несмотря на множество исследований, посвященных анализу отработанных моторных масел, их результаты, в значительной степени, являются достаточно противоречивыми. Кроме того, нужно учитывать наличие большого разнообразия смазочных масел и присадок, улучшающих их свойства.

Свет, проходя через слой жидкости со взвешенными твердыми частицами, поглощается. Коэффициент поглощения зависит от длины волны света. Моторное масло с магнитными частицами продуктов износа представляет собой магнитную жидкость. Показано, что для магнитных жидкостей максимум пропускания света лежит в области длинных волн [6]. При увеличении частоты волны поглощение света резко усиливается. Ослабление света вызвано рассеянием света коллоидными частицами и их агрегатами.

Зависимости коэффициентов поглощения от длины волны в статье [7] использованы для определения свойств и качества судовых топлив и масел с целью их идентификации. Для этого была предложена методика, основанная на вычислении характеристик окраски.

При наложении постоянного магнитного поля магнитная жидкость становится анизотропной. В оптическом диапазоне появляется анизотропия поглощения (дихроизм). Продукты износа ферромагнитных деталей двигателя в отработанном

моторном масле являются дисперсной системой, в которой можно наблюдать эффект Коттона – Мутона. Устойчивость такого коллоидного раствора ферромагнитных частиц обеспечивается наличием диспергирующих присадок в масле. Без ПАВов, содержащихся в присадках, магнитное взаимодействие частиц сопровождается их быстрым слипанием (агрегацией) и расслоением раствора.

Основным физическим механизмом, объясняющим появление оптической анизотропии магнитных жидкостей, является ориентация магнитных частиц и их агрегатов во внешнем поле [8]. В литературе имеется довольно большое количество публикаций по анизотропии магнитных коллоидов. Однако достаточно много сторон этого явления остаются не изученными.

Флуоресцентная спектроскопия является наилучшей доступной оптической методикой, поскольку она предоставляет высокий чувствительность, хороший диагностический потенциал, относительно простое оборудование и идеально подходит для портативных приборов. Учитывая высокую чувствительность и неразрушающую способность, метод флуоресценции предоставляет исследователям надежные средства для характеристики и различения моторных масел.

В статье [9] представлен метод флуоресценции с временным разрешением для классификации моторных масел на основе лазерного возбуждения на длине волны 266 нм. Полученные в данной статье результаты свидетельствуют о возможности дифференциации моторных масел на основе предложенного нового метода, обеспечивающего надежные методы анализа и классификации моторных масел. Предложенный метод превосходит по своим возможностям метод стационарной флуоресценции. Данный метод позволил успешно классифицировать девять моторных масел.

В работе [10] спектроскопия флуоресценции для одной длины волны возбуждения была использована для получения конкретных характеристик смазочного масла, обычно используемого в судовых двигателях в качестве инструмента для смазки. Рассмотрены флуоресцентные свойства свежего и отработанного масла, которое эксплуатировалось достаточно большое время. Продемонстрирована возможность различать смазочное масло свежее и после эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания. Спектры флуоресценции возбуждались на длине волны 220 нм, а идентификация производилась по изменению интенсивности флуоресценции на длинах волн 295 нм и 335 нм.

Результаты исследования спектров флуоресценции некоторых судовых нефтепродуктов приведены в работе [11]. Полученные данные могут быть использованы для определения вида нефтепродукта, его качества и соответствия стандарту.

В настоящей работе приводятся результаты исследования отработанных судовых моторных масел методом флуоресценции и методом абсорбции света видимого и ИК диапазонов в магнитном поле с целью обнаружения ферромагнитных частиц износа для диагностики неисправностей узлов судового дизеля в процессе эксплуатации.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Измерения спектров поглощения выполнялись с использованием спектрофотометра СФ-2000. Регистрировались спектры поглощения в диапазоне видимого и УФ диапазонов 200 нм - 1100 нм. Применялись стандартные стеклянные кюветы размером 10x10 мм. Исследовались образцы чистого и отработанного в течение 300 час. масла Mobil 10w40. Магнитное поле создавалось постоянными неодимовыми магнитами с остаточной магнитной индукцией 1.2 Тл. Величина магнитного поля контролировалась с помощью тесламетра ТПУ-02.

Эксперименты со спектрами флуоресценции были выполнены на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама». Регистрировались одномерные спектры с постоянной длиной волны возбуждения, соответствующей максимуму спектра излучения. Спектральный диапазон в канале регистрации флуоресценции составил 400-800 нм. Так как отработанные масла непрозрачны, для измерений их приходилось сильно разбавлять. В качестве растворителей использовались свежие моторные масла.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Отработанное моторное масло с продуктами износа может рассматриваться как сильно разбавленная магнитная жидкость. Размеры металлических частиц настолько малы, что они взвешены в масле, т.к. оседать им не дает броуновское движение. Присадки в моторных маслах содержат поверхностно-активные вещества, которые создают на магнитных частицах адсорбционный слой, предотвращающий их агломерацию.

Коллоидная наночастица магнитного вещества обладает постоянным магнитным моментом, который пропорционален объему частицы $m = M_s V$, здесь M_s – намагниченность насыщения материала частицы. Магнитные моменты частиц ориентируются вдоль силовых линий однородного магнитного поля. В неоднородном магнитном поле, кроме ориентирующего частицу момента сил, на магнитную частицу будет действовать также сила $\vec{F} = \mu_0 m \nabla H$, направленная в сторону более сильного магнитного поля. Здесь H – величина напряженности магнитного поля. Т.е. магнитные диполи частиц не только ориентируются по полю, но и двигаются по градиенту поля.

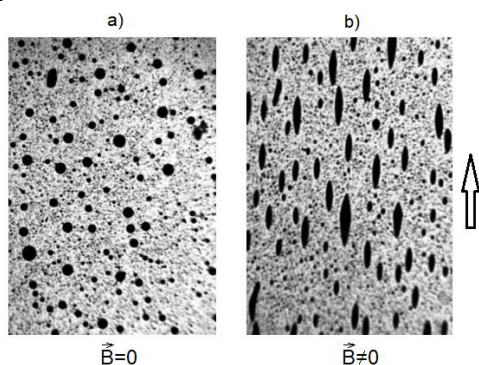


Рис. 1. Ферромагнитные частицы в отработанном масле при отсутствии (а) и при наличии магнитного поля (б) (адаптировано из [12]).

Ферромагнитные частицы продуктов износа в отработанном моторном масле имеют как почти сферическую, так и вытянутую форму. Действие магнитного поля на отработанное масло приводит к ориентации ферромагнитных частиц, к деформации и соединению слипшихся частиц в вытянутые образования. В результате появляется упорядоченная структура типа решетки, исчезающая при выключении магнитного поля (рис.1). Магнитооптические эффекты – результат анизотропии свойств такой среды.

Спектры поглощения света в диапазоне видимых – ИК длин волн 400-1000 нм для чистого и отработанного моторного масла Mobil 10w40 в нулевом магнитном поле и в поле с индукцией $B=0.15$ Тл показаны на рис. 2.

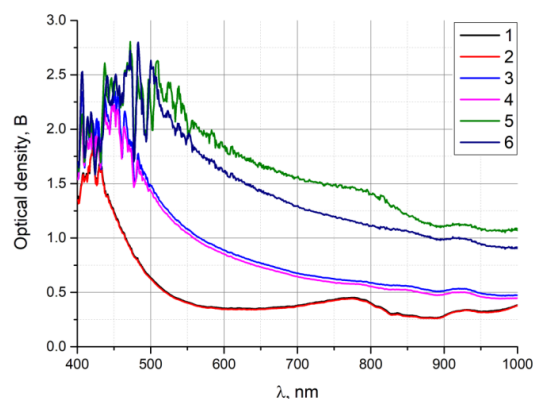


Рис. 2. Спектры поглощения масла Mobil 10w40: 1 – чистое, 2 – чистое в магнитном поле, 3 – отработанное 300 час. 0.4 %, 4 – отработанное 300 час. 0.4 % в магнитном поле, 5 – отработанное 300 час. 0.8 %, 6 – отработанное 300 час. 0.8 % в магнитном поле.

Коэффициент пропускания света (прозрачность среды) равен: $\tau = \frac{\Phi_{\text{прош}}}{\Phi_{\text{пад}}}$, где $\Phi_{\text{пад}}$ – падающий световой поток, $\Phi_{\text{прош}}$ – прошедший среду световой поток. Оптическая плотность среды равна: $D = \log \frac{1}{\tau}$. Кривая 1 на рис.2 представляет собой спектр поглощения для чистого масла. Кривая 2 – это спектр поглощения чистого масла в магнитном поле. Кривая 2 ожидаемо совпадает с кривой 1, так как магнитные частицы в чистом масле отсутствуют. Отработанное масло из-за наличия большого числа частиц сажи оптически непрозрачно. Поэтому для исследования использовался раствор отработанного масла в масле свежем. На рис. 2 показаны спектры поглощения для 0.4% и 0.8% растворов отработанного масла, без магнитного поля и с магнитным полем. Кривая 3 – спектр поглощения 0.4 % раствора отработанного 300 час. масла без поля и кривая 4 – спектр этого же раствора в магнитном поле. Кривая 4 располагается ниже кривой 3, т.е. оптическая плотность раствора отработанного масла в магнитном поле понижается, наблюдается «просветление» среды. Еще больше виден этот эффект с 0.8% раствором отработанного масла: кривая 5 – спектр поглощения без поля и кривая 6 – спектр поглощения в магнитном поле. Объяснить этот эффект можно тем, что в магнитном поле ферромагнитные частицы двигаются в область полюсов магнитного поля, увлекая за собой частицы

сажи, что и приводит к некоторому «просветлению» среды.

Исследование спектров поглощения показало, что для различных нефтепродуктов оптическая плотность, вызванная электронным поглощением, хорошо описывается выражением:

$$D = Ce^{\chi} = Ce^{\frac{h\nu}{U}}, \quad (1)$$

здесь χ - характеристика окраски, а C - цветовой параметр нефтепродукта при данной толщине его слоя, λ - длина облучающей волны, U - энергия активации.

Поглощение света увеличивается при уменьшении длины волны у всех исследованных нефтепродуктов. Это электронное поглощение и оно вызвано ароматическими молекулами этих углеводородов. Граница электронного поглощения в спектрах располагается не одинаково и ее положение обусловлено вкладом различных молекул нефтепродуктов. В длинноволновой области сильное электронное поглощение испытывают смолистые масла, легкие нефтепродукты мало поглощают даже в диапазоне коротких волн.

Спектры пропускания (прозрачности) тех же образцов, что и на рис. 2 показаны на рис.3. Как видно спектр для чистого масла имеет три выраженных окна прозрачности в области 650 нм, 870 нм и 960 нм. В отработанных маслах из-за наличия сажи коэффициент пропускания на всех длинах волн падает и окон прозрачности не наблюдается.

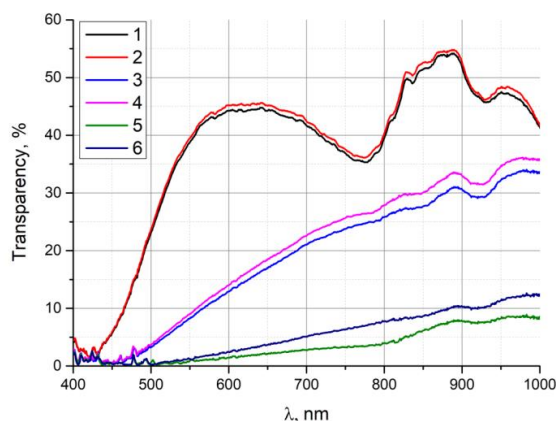


Рис. 3. Спектры прозрачности масла Mobil 10w40: 1- чистое, 2 – чистое в магнитном поле, 3 – отработанное 300 час. 0.4 %, 4 - отработанное 300 час. 0.4 % в магнитном поле, 5 - отработанное 300 час. 0.8 %, 6 - отработанное 300 час. 0.8 % в магнитном поле.

Рис. 4 иллюстрирует изменение спектров поглощения отработанного масла с течением времени с момента помещения образца в магнитное поле. По мере движения магнитных частиц в области сильного магнитного поля и увлечения за собой частиц сажи наблюдается уменьшение оптической плотности отработанного масла на всех длинах волн.

Скорость этого процесса, очевидно, определяется дисперсностью частиц в отработанном масле, вязкостью масла и величиной магнитного поля.

Уменьшение интегральной оптической плотности в видимом диапазоне для отработанного масла со временем после включения магнитного поля иллюстрирует рис. 5. Зависимость аппроксимирована функцией: $\Delta D = A(1 - e^{-\alpha t})$, где $A=13.5$ В, $\alpha = 0.1$ мин⁻¹.

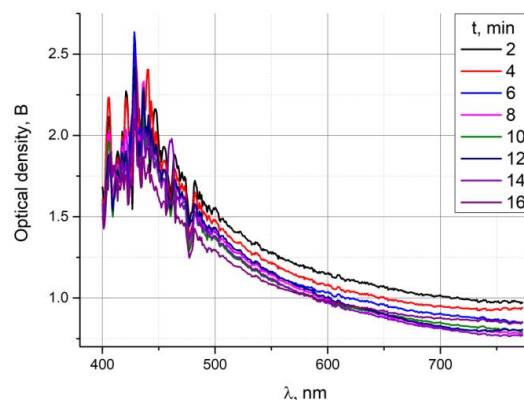


Рис. 4. Просветление отработанного масла с течением времени после включения магнитного поля.

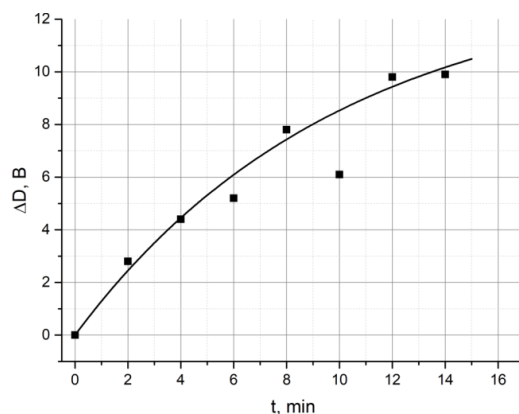


Рис. 5. Уменьшение интегральной оптической плотности в видимом диапазоне для отработанного масла со временем после включения магнитного поля.

Таким образом, предлагается способ обнаружения ферромагнитных частиц продуктов износа деталей двигателя в отработанных моторных маслах, основанный на абсорбционной фотонной спектроскопии в магнитном поле. Показана зависимость оптической плотности отработанного моторного масла от концентрации частиц, что позволит определять степень износа трущихся деталей в процессе эксплуатации двигателя. Высказано предположение о механизме увеличения прозрачности отработанного масла при помещении его в магнитное поле. Показана кинетика этого процесса и определено характерное время.

Таблица 1

Некоторые характеристики изученных моторных масел

Показатель	Марка образца					
	Mobil 5w30	Mobil 5w40	Mobil 10w40	Rimula 15w40	Total M4015	TPEO 12/40
Плотность, кг/м ³	865	867	866	910	904	897
Вязкость кинематическая при 100°C, мм ² /с	10.4	12,6 -16,3	15,1	12.5-16.3	14	14.5
Индекс вязкости	153	180	147	-	-	-
Щелочное число, мг КОН/г	7.4	6.2	8.1	5.9	14	12
Температура застывания, °C	-42	-45	-42	-30	-9	-6
Температура вспышки, °C	230	>224	234	230	230	230

Таблица 2

Основные показатели спектров флуоресценции свежих и отработанных моторных масел при $\lambda_{\text{возб}} = 390 \text{ нм}$

№ п/п	Образец	$\lambda_{\text{тах флуор.}} \text{ нм}$		$\frac{\lambda_{\text{тах флуор.свеж.}}}{\lambda_{\text{тах флуор.отраб.}}}$
		свежее	отработанное	
1	Mobil 5w30	474	520 (170 час., 1.7%)	0.91
2	Mobil 5w40	476	527 (160 час., 2.5%)	0.90
3	Mobil 10w40	448	460 (300 час., 2.5%)	0.97
4	Rimula 15w40	471	480 (250 час., 2.5%)	0.98
5	Total M4015	540	540 (300 час., 0.9%)	1.00
6	TPEO 12/40	541	528 (300 час., 0.9%)	1.02

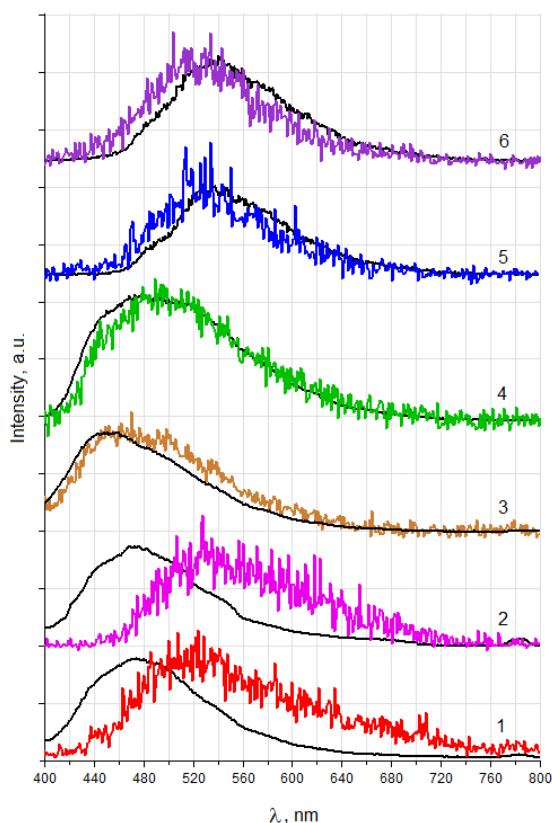


Рис. 6. Спектры флуоресценции свежих и отработанных моторных масел: Mobil 5w30 (1), Mobil 5w40 (2), Mobil 10w40 (3), Rimula 15w40 (4), Total M4015 (5) и TPEO 12/40 (6) при $\lambda_{\text{возб}} = 390 \text{ нм}$.

Основные характеристики исследованных методом флуоресценции масел сведены в таблицу 1. Результаты исследования свежих и отработанных моторных масел иллюстрируют рис. 6 и таблица 2.

Спектры флуоресценции свежих и отработанных масел, представленные на рис. 6, нормированы для определения сдвигов длин волн, соответствующих максимумам.

Как видно из таблицы 2, максимальный сдвиг длины волны флуоресценции у отработанных масел Mobil 5w30 и Mobil 5w40, а у отработанного масла Total M4015 сдвиг отсутствует.

Окисление углеводородов нефтепродуктов приводит к резкому уменьшению амплитудных характеристик спектров флуоресценции и к небольшому смещению максимумов спектров. Уменьшение интенсивности флуоресценции отработанных масел вызвано также небольшой концентрацией (0.9% - 2.5%) отработанных масел в растворителях, которыми служат соответствующие свежие масла. Центрами излучения в отработанных маслах являются оставшиеся не окисленные ароматические углеводороды.

Сдвиг линий флуоресценции в сторону длинных волн у отработанных масел вызван тем, что часть поглощенной энергии в них теряется в безызлучательных переходах. В результате этого испускаемые фотоны имеют меньшую энергию.

Заключение

Выполненные исследования показали, что спектральные характеристики флуоресценции изученных свежих и отработанных моторных масел определяются многими факторами. Они являются ценным источником информации о присутствии продуктов износа в отработанных моторных маслах.

Результаты выполненного исследования также показывают, что метод экстинкции света в образцах отработанного масла в магнитном поле позволяет получать информацию о наличии и о концентрации ферромагнитных частиц износа узлов двигателя, т.е. для получения диагностических данных о состоянии двигателя по отработанному маслу. Предлагаемый способ дает возможность обнаружения дефектов на ранней стадии их формирования, улучшит

оперативность предотвращения сбоев в работе оборудования и обеспечит безопасность мореплавания. В сочетании с другими методами анализа этот способ позволит осуществлять диагностику и прогнозирования состояния двигателя по деградации судовых смазочных материалов.

Литература

1. Фитч Дж., Тройер Д. (2015) Анализ масел. Основы и применение. Перевод с англ. 2-го изд. 2010, Oil Analysis Basics) под ред. Е. А. Новикова, Кирюхина М.В. 166 стр.
2. Zhu J., He D., Bechhoefer E. (2013). Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring. Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Journal of Chemical Science and Technology, 2(3), 100-115.
3. Knowles M. and Baglee D. (2012). Condition Management of Marine Lube Oil and the Role of Intelligent Sensor Systems in Diagnostics. IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series, 364, 012007.
4. Oil Analysis Handbook for Predictive Equipment Maintenance. https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf.
5. Синявский Н.Я., Корнева И.П., Иванов А.М., Кострикова Н.А. (2020) Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света, Морские интеллектуальные технологии, №4, 103-108.
6. Фертман В.Е. (1988) Магнитные жидкости: Справочное пособие.- Минск.: Высшая школа, 184 с.
7. Синявский Н.Я., Корнева И.П., Кострикова Н.А. (2019) Применение инверсии интегрального преобразования в ультрафиолетовой-видимой абсорбционной спектроскопии для анализа судовых топлив и масел, Морские интеллектуальные технологии. Т. 45(3). 89-93.
8. Ерин К.В. (2009) Оптическая анизотропия коллоидных растворов наноразмерных частиц магнетита в магнитном и электрическом полях, Вестник Ставропольского государственного университета, т.63, 96-98,
9. Mu T., Chen S., Zhang Y., Guo P., Chen H., and Meng F. (2014) Motor Oil Classification Based on Time-Resolved Fluorescence, PLoS One. 2; 9(7): e100555. doi: 10.1371/journal.pone.0100555.
10. Baszanowska E., Otremba Z. (2015) ,Lubricate engine oil characterization based on single excitation fluorescence spectroscopy, Zeszyty naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, № 91, 5-12
11. Корнева И.П., Синявский Н.Я. (2019) Спектры флуоресценции для идентификации судовых топлив и масел, В сборнике: Балтийский морской форум. Материалы VII Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. С. 18-24.
12. Диканский Ю.И., Туркин С.Д. (2017) Об эффекте Фарадея в магнитных коллоидных наносистемах, Журнал технической физики, т. 87, вып. 12, 1895-1901.

References

1. Fitch J., Troyer D. (2015) Oil Analysis. Fundamentals and application. Translation from English. 2nd ed. 2010, Oil Analysis Basics, ed. E. A. Novikova, Kiryukhina M. V. 166 p.
2. Zhu J., He D., Bechhoefer E. (2013). Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring. Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Journal of Chemical Science and Technology, 2(3), 100-115.
3. Knowles M. and Baglee D. (2012). Condition Management of Marine Lube Oil and the Role of Intelligent Sensor Systems in Diagnostics. IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series, 364, 012007.
4. Oil Analysis Handbook for Predictive Equipment Maintenance. https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf.
5. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P., Ivanov A.M., Kostrikova N.A. (2020) Dynamic Light Scattering Study of Marine Engine Oils, Marine Intelligent Technologies, No. 4, 103-108.
6. Fertman V.E. (1988) Magnetic fluids: Reference manual. - Minsk.: Higher school, 184 p.
7. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P., Kostrikova N.A. (2019) Application of integrated transform inversion in ultraviolet-visible absorption spectroscopy for the analysis of marine fuels and oils, Marine Intelligent Technologies. Т. 45(3). 89-93.
8. Erin K.V. (2009) Optical anisotropy of colloidal solutions of magnetite nanoparticles in magnetic and electric fields, Bulletin of the Stavropol State University, v.63, 96-98,
9. Mu T., Chen S., Zhang Y., Guo P., Chen H., and Meng F. (2014) Motor Oil Classification Based on Time-Resolved Fluorescence, PLoS One. 2; 9(7): e100555. doi: 10.1371/journal.pone.0100555.
10. Baszanowska E., Otremba Z. (2015) ,Lubricate engine oil characterization based on single excitation fluorescence spectroscopy, Zeszyty naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, № 91, 5-12
11. Korneva I.P., Sinyavsky N.Ya. (2019) Fluorescence Spectra for the Identification of Marine Fuels and Oils, In: Baltic Sea Forum. Materials of the VII International Baltic Maritime Forum. In 6 volumes. pp. 18-24.
12. Dikansky Yu.I., Turkin S.D. (2017) On the Faraday effect in magnetic colloidal nanosystems, Journal of Technical Physics, vol. 87, no. 12, 1895-1901.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ирина Павловна Корнева, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: zxc127@rambler.ru

Irina P. Korneva, Ph.D. (Eng.), Assistant professor, Professor of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: zxc127@rambler.ru

Николай Яковлевич Синявский, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Nikolai Ya. Sinyavsky, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Professor of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Наталья Анатольевна Кострикова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Natalya A. Kostrikova, Ph.D. (Phys & Math.), Assistant professor, Assistant professor of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 17.11.2022.

Научная статья

УДК 629.5.064.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.066>**Результаты экспериментальных исследований нелинейных нагрузок системы электроснабжения объекта морской индустрии****В.Ф. Белей**¹ vbeley@klgtu.ru, **К.В. Коротких**¹ kirill-korotkikh@bk.ru, **В.Д. Самарин**¹ w.d.samarin@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Основной круг вопросов, составляющих содержание данной работы: количественная оценка высших гармоник, генерируемых различными нелинейными нагрузками в систему электроснабжения судостроительного завода, а именно сварочными аппаратами, светодиодными лампами, конденсаторными установками и другими. На объекте морской индустрии доля нелинейного электрооборудования и приборов в процентах от общей установленной мощности всех электроприёмников предприятия составляет более 35 %. Дальнейшее неконтролируемое увеличение мощности нелинейных нагрузок позволит добиться существенного снижения расхода электроэнергии; массогабаритных показателей; увеличения функциональных возможностей электрооборудования, однако приведёт к искажению синусоидальности кривой напряжения, что вызовет значительный рост гармонических составляющих тока и напряжения; коммутационным перенапряжениям и ухудшению других показателей качества электроэнергии, а также не будет сопровождаться своевременной разработкой рекомендаций и технических решений, направленных на обеспечение показателей качества в соответствии с ГОСТ. Таким образом, имеет место проблема повышения энергетической безопасности и эффективности системы электроснабжения объекта морской индустрии. В работе представлена структура, режим работы системы электроснабжения судостроительного завода и его нелинейных электроприёмников. Приведены результаты экспериментальных исследований, характеризующие высокие уровни гармонических составляющих тока в цепях с нелинейными нагрузками. Результаты, характеризующие уровень эмиссии высших гармоник тока в электрическую сеть, могут быть использованы при реструктуризации системы электроснабжения завода для повышения качества электроэнергии. Разработана методика проведения экспериментальных исследований высших гармонических.

Ключевые слова: качество электроэнергии, высшие гармоники, ток, система электроснабжения объекта морской индустрии, нелинейные нагрузки.

Для цитирования: Белей В.Ф., Коротких К.В., Самарин В.Д. Результаты экспериментальных исследований нелинейных нагрузок системы электроснабжения объекта морской индустрии, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 79—85.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.066>**The results of experimental studies of non-linear loads of a marine industry facility's electrical power supply system****Valeriy F. Beley**¹ vbeley@klgtu.ru, **Kirill V. Korotkikh**¹ kirill-korotkikh@bk.ru,**Vasiliy D. Samarin**¹ w.d.samarin@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The main range of issues that make up the content of this work: a quantitative assessment of higher harmonics generated by various non-linear loads in the power supply system of a shipyard, namely welding machines, LED lamps, capacitor units and others. At the marine industry facility, the share of non-linear electrical equipment and devices as a percentage of the total installed capacity of all electrical receivers of the enterprise is more than 35%. Further uncontrolled increase in the power of non-linear loads will make it possible to achieve a significant reduction in power consumption; weight and size indicators; increasing the functionality of electrical equipment, however, it will lead to a distortion of the sinusoidality of the voltage curve, which will cause a significant increase in the harmonic components of current and voltage; switching surges and deterioration of other power quality indicators, and will not be accompanied by the timely development of recommendations and technical solutions aimed at ensuring quality indicators in accordance with GOST. Thus, there is a problem of increasing the energy security and efficiency of the power supply system of the marine industry. The paper presents the structure, mode of operation of the power supply system of a shipyard and its non-linear electrical receivers. The results of experimental studies characterizing high levels of current harmonic components in circuits with non-linear loads are presented. The results characterizing the level of emission of higher current harmonics into the electrical network can be used in the restructuring of the power supply system of the plant to improve the quality of electricity. A technique for conducting experimental studies of higher harmonics has been developed.

Keywords: power quality, higher harmonics, current, power supply system of a marine industry facility, non-linear loads.

For citation: Valeriy F. Beley, Kirill V. Korotkikh, Vasiliy D. Samarin, The results of experimental studies of non-linear loads of a marine industry facility's electrical power supply system, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 79—85.

Введение

В настоящий момент существует проблема в обеспечении электромагнитной совместимости источников высших гармоник и других нагрузок систем электроснабжения объектов морского базирования. Анализ выполненных по этой проблеме исследований, показывает, что неконтролируемый рост установленной мощности нелинейных электроприёмников не всегда сопровождается своевременной разработкой научно-обоснованных рекомендаций и технических решений в области обеспечения показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ. Проблема осложняется также тем, что фирмы-производители не предоставляют полный перечень данных технологий, характеризующих уровень эмиссии электромагнитных помех в электрическую сеть. Поэтому важной частью является проведение экспериментальных исследований высших гармонических составляющих, эмитируемых в систему электроснабжения объекта морской индустрии нелинейными электроприёмниками.

1. Структура, режим работы системы электроснабжения судостроительного завода и его нелинейных электроприёмников

Система электроснабжения судостроительного завода трёхуровневая (рис. 1).

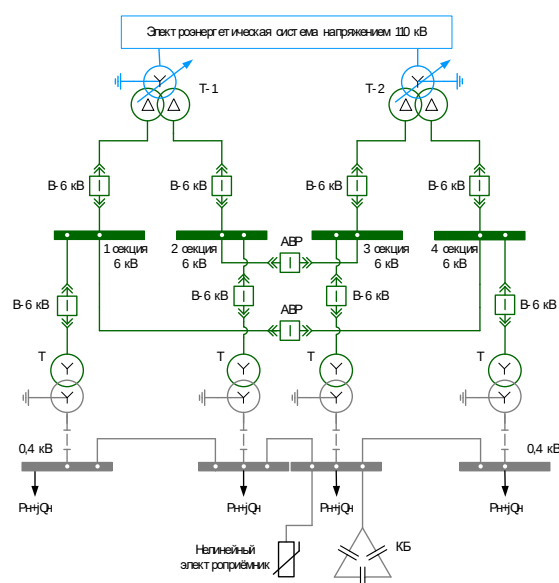


Рис. 1. Трёхуровневая система электроснабжения судостроительного завода

Первый уровень – внешнее электроснабжение. Это питающие линии напряжением 110 кВ, соединяющие трансформаторные подстанции энергосистемы с приемными трансформаторными подстанциями завода.

Важным показателем с позиций обеспечения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) [1] и возможности получения от энергосистемы необходимой мощности является мощность короткого замыкания ($S_{кз}$) – мощность в той точке энергосистемы, к которой подключена система электроснабжения предприятия (рис. 2) [2, 3]:

$$S_{кз} = \frac{\sqrt{3}U_{ном}^2}{Z_{кз}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где: $Z_{кз}$ – сопротивление до точки в энергосистеме, где мощность энергосистемы по сравнению с мощностью нагрузки предприятия ($S_{нг}$) является бесконечно большой;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети.

Напряжение на выводах электроприёмников электрической энергии будет определяться напряжением, подводимым от источника энергии ($U_{ист}$) и суммой падений напряжений от всего спектра высших гармонических:

$$u = u_{ист} + \sum_{n=2}^{\infty} u_n \quad (2)$$

где: u_n – напряжение n-й гармоники.

Нелинейная нагрузка не будет оказывать столь заметного влияния на отклонение напряжения на выводах электроприёмников при условии подключения нагрузок к узлу системы электроснабжения с высоким значением $S_{кз}$:

$$S_{кз} \gg S_{нг} \quad (3)$$

Второй уровень – внутризаводское электроснабжение, состоящее из четырёх главных распределительных подстанций и комплекса распределительных сетей, осуществляющий прием, распределение и передачу электрической энергии к пунктам питания.

Третий уровень – внутрицеховое электроснабжение. Это комплекс внутрицеховых трансформаторных подстанций, распределительных сетей, пунктов питания и сетей непосредственного питания электроприёмников напряжением до 1 кВ.

В настоящее время на судостроительном заводе наблюдается значительный рост доли нелинейной нагрузки. В табл. 1 приведена общая характеристика о доле нелинейного электрооборудования и приборов судостроительного завода.

Таблица 1

Доля нелинейного электрооборудования и приборов завода в процентах от установленной мощности всех электроприёмников

Тип электрооборудования и приборов	в % от установленной мощности всех электроприёмников завода
Сварочные аппараты	18 %
Светодиодные лампы	1 %
Линейные и компактные люминесцентные лампы	1,5 %
Электротермические установки и гальванические ванны	11 %
Прочее	4 %

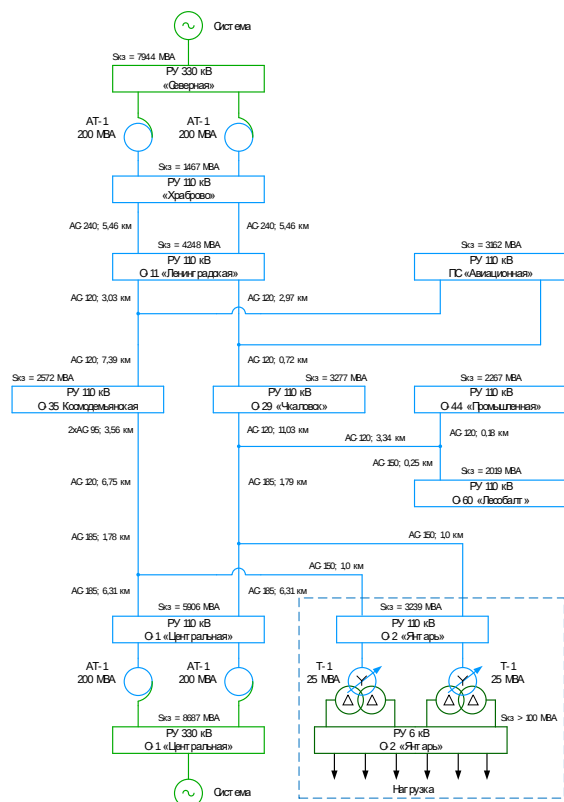


Рис. 2. Схема подключения системы электроснабжения завода к энергосистеме и значения мощности короткого замыкания на шинах 6, 110 и 330 кВ

Значительное влияние на отклонение напряжения на выводах электроприемников оказывает реактивная мощность нагрузки [2, 4]. В связи с этим были проведены замеры перетоков активной и реактивной мощностей на фидерах (Ф.) четырех головных подстанций завода (табл. 2).

Таблица 2

Перетоки активной и реактивной мощностей в летний период на вводных фидерах головных подстанций объекта морской индустрии

Центр питания		$P_{\text{макс}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{макс}}, \text{кВАр}$	$\text{tg}\phi$
Подстанция № 27	Ф. № 02-47	1501	360,5	0,24
	Ф. № 02-48	1149	907,4	0,79
Подстанция № 47	Ф. № 02-30	448	439,2	0,98
	Ф. № 02-31	514	401,3	0,78
Подстанция № 7	Ф. № 02-15	1115	769,5	0,69
Подстанция № 1	Ф. № 02-04	302	234,6	0,78

Анализ полученных данных показал, что на всех вводах кроме 02-47 (Подстанция №27) наблюдается

превышение предельного значения $\text{tg}\phi$, заявленного на уровне 0,4, более чем в два раза, а на вводе 02-30 (Подстанция №47) в три раза.

2. Результаты исследования высших гармоник в нелинейных элементах системы электроснабжения объекта морской индустрии

Сварочные аппараты.

Поскольку на судостроительных заводах значительную долю электрооборудования занимают сварочные агрегаты, исследованиям высших гармонических (ВГ), эмитируемых ими в систему электроснабжения завода, уделено особое внимание.

В аппаратах, эксплуатируемых на предприятии используются сварочные выпрямители отечественного производства (рис. 3).

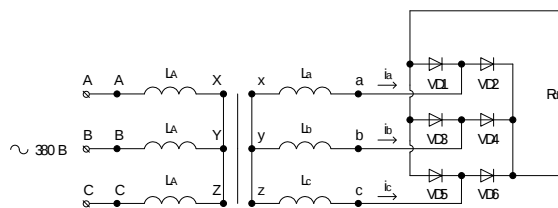


Рис. 3. Схема сварочного трёхфазного мостового выпрямителя [5]

Токи высших гармонических, которые генерируются сварочными выпрямителями, различны для отдельных режимов его работы [5]:

- Режим прерывистых токов при малых нагрузках, которому соответствует двухвентильная коммутация;
- Режим смешанной трёхвентильной коммутации при средних нагрузках;
- Режим трёхвентильной коммутации при максимальных нагрузках.

Для суждения о характере этого процесса в сетях со сварочными нагрузками измерялись гармоники тока на распределительном шинном проводе 0,4 кВ судостроительного завода.

В табл. 3. представлены технические параметры сварочного аппарата, эксплуатируемого на объекте морской индустрии. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Таблица 3

Технические параметры ВДМ-1600

Тип сварочного аппарата	ВДМ-1600
$U_{\text{сети}}, \text{В}$	380
$S_{\text{ном}}, \text{кВт}$	120
$U_{\text{ном.раб}}, \text{В}$	60
$I_{\text{ном.выпрямленный}}, \text{А}$	1600
$I_{\text{ном.1 поста}}, \text{А (ПВ \%)}$	315 (60 \%)
Число сварочных постов	8
$\eta, \%$	90

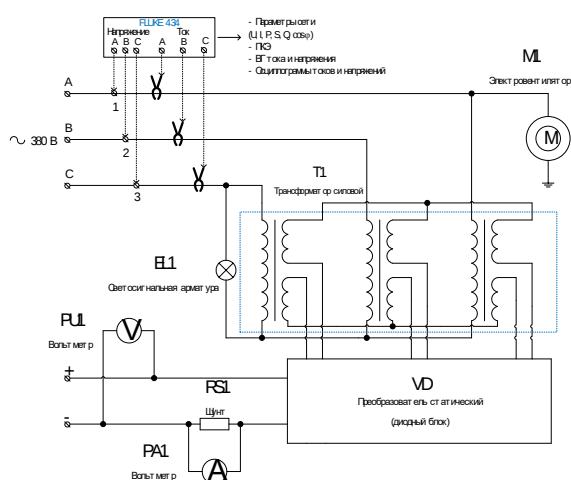


Рис. 4. Схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник сварочного аппарата

Было проведено 4 цикла измерений в течение дневной рабочей смены. Значения высших гармоник тока в первичной цепи исследуемого сварочного аппарата в режиме средних и максимальных нагрузок приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Значения высших гармоник тока исследуемого сварочного аппарата в режиме средних нагрузок

Номер гармоники (n)	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	27,9	2,3	26,1
5	11,2	10,3	10,6
7	0,7	0,6	0,3
9	0,5	0,1	0,6
11	0,4	0,4	0,4
13	0,4	0,4	0,3
15	0,3	0,2	0,3
$K_i, \%$	29,9	11,0	28,1

Таблица 5

Значения высших гармоник тока исследуемого сварочного аппарата в режиме максимальных нагрузок

Номер гармоники (n)	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	32,1	12,9	38,7
5	18,8	5,0	9,1
7	10,7	2,8	6,3
9	9,5	3,1	7,0
11	8,6	3,6	7,4
13	6,0	3,7	6,8
15	8,2	3,1	6,5
$K_i, \%$	104,8	39,8	79,9

где: K_i – суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой тока в точке передачи электрической энергии [2]:

$$K_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

где: I_n – амплитудное значение тока n-гармоники;
 I_1 – амплитудное значение тока 1-й гармоники.

Анализ результатов измерений свидетельствует о нестабильном уровне высших гармоник тока, меняющемся в широких пределах в течение одной смены. Малое изменение условий горения дуги ведёт к увеличению или уменьшению токов гармоник высшего порядка в несколько раз [5].

Светодиодные лампы

В настоящее время всё большее распространение и совершенствование получают светодиодные осветительные приборы, характеризующиеся высокой долей в энергоэффективности, сроке эксплуатации и занимающие наибольшую долю на мировом рынке среди всех светотехнических изделий. Однако, из-за отсутствия полного перечня данных об уровне электромагнитных помех, вносимых светодиодной лампой в электрическую сеть, колебаниях светового потока и потребляемой реактивной мощности, выбор перспективных моделей для системы электроснабжения завода должен основываться на предварительных экспериментальных исследованиях.

На светодиодные лампы в системе освещения судостроительного завода приходится 24% от общего числа осветительных приборов (табл. 6).

Таблица 6

Сводные данные по системе освещения завода

Тип ламп	Количество светильников		Общая установленная мощность	
	шт.	%	кВт	%
Лампы накаливания	7490	41	904	42
Линейные и компактные люминесцентные лампы	5420	30	474	22
Дуговые ртутные лампы высокого давления	1055	6	461	21
Светодиодные лампы	4350	24	304	14

Для оценки влияния светодиодных ламп на качество электроэнергии в системе электроснабжения завода были проведены экспериментальные исследования с использованием комплекса оборудования: анализатора показателей качества электроэнергии Fluke-434 и двухлучевого осциллографа GDS-71042, позволившего получить достаточный объём данных для подробного исследования энергетических характеристик ламп 9 Вт (Лампа №1) и 11 Вт (Лампа №2).

На рис. 5 представлена схема экспериментальной установки по исследованию данных светодиодных ламп.

Осциллограммы линейного тока и фазного напряжения двух исследуемых ламп (9 и 11 Вт) представлены на рис. 6. Результаты измерений энергетических характеристик исследуемых светодиодных ламп приведены в табл. 7.

Таблица 7
Данные, снятые анализатора показателей качества электроэнергии Fluke-434

Параметр	Лампа № 1	Лампа № 2
U, В	223,2	223,1
I, А	0,053	0,084
P, Вт	9,2	10,6
Q, ВАр	6,3	14,4
cosφ	0,82	0,59
Значения высших гармоник тока, %	K3, %	25
	K5, %	20
	K7, %	9
	K9, %	9
	K11, %	4
	K13, %	9
	K15, %	6
K_i , %	34,8	124,7

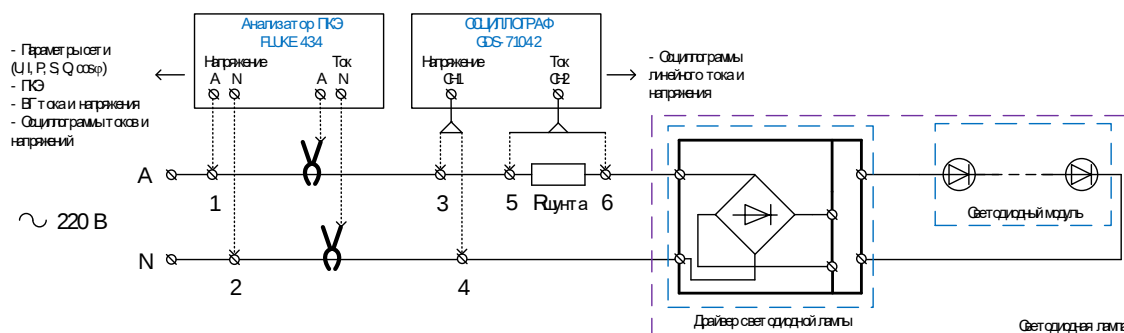


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по исследованию светодиодных ламп

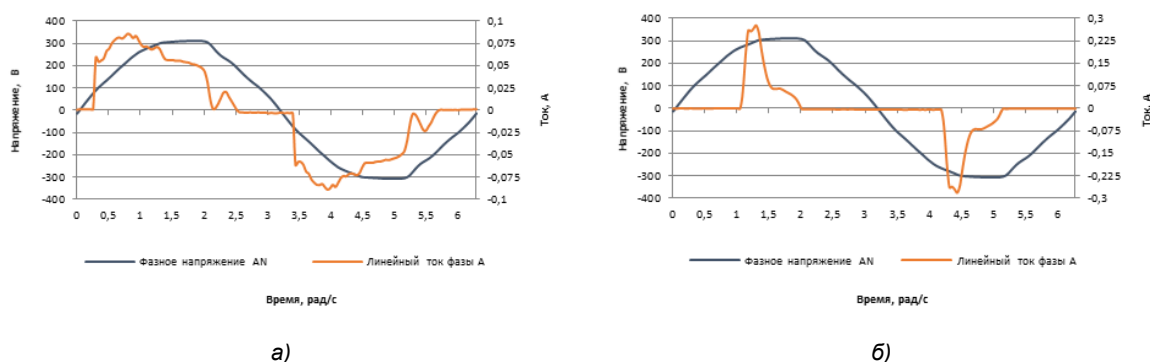


Рис. 6. Осциллограммы линейного тока и фазного напряжения двух светодиодных ламп: 9 Вт (а), 11 Вт (б)

Конденсаторные батареи

Отдельным вопросом является исследование высших гармоник эмитируемых конденсаторной батареей в питающую сеть.

На рис. 7. показана схема экспериментальной установки. Осциллограмма линейного тока в цепи конденсаторной установки приведена на рис. 8. В табл. 8. представлены технические параметры исследуемой конденсаторной установки.

Таблица 8
Технические параметры конденсаторной батареи

Тип конденсаторов	Ураб, В	Количество конденсаторов, шт	C, мкФ
МБГО-2	До 300	9	20
		3	30

Значения высших гармоник тока исследуемой конденсаторной установки представлены в табл. 9.

Данные, полученные в ходе эксперимента (табл. 7), свидетельствуют о высоком уровне потребляемой реактивной мощности и суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой тока, низком значении cosφ светодиодной лампы №2.

Встроенный модуль питания светодиодной лампы (драйвер), являясь нелинейным элементом, вызывает эмиссию высших гармоник тока в электрическую сеть. Об этом свидетельствует искажение синусоидальности кривых тока 1 и 2 светодиодных ламп (рис. 6).

С позиции обеспечения качества электроэнергии в системе освещения судостроительного завода определяющие значения имеют такие показатели, как отрицательное и положительное отклонения напряжения, кратковременная и длительная дозы фликера, несинусоидальность напряжения [6].

Таблица 9
Результаты обработки осциллограммы тока в цепи конденсаторной батареи

Номер гармоники (n)	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	0,6	0,5	0,3
5	7,1	8,9	7,6
7	11,2	10,1	6,0
9	1,0	6,0	6,2
11	2,1	2,3	1,9
13	0,9	0,5	0,6
15	0,2	0,8	0,7
K_i , %	13,8	15,3	11,7

Анализ экспериментальных данных показал, что по двум линейным проводам протекают 9-я, 15-я гармоники, вследствие чего происходит резкое

увеличение ВГ тока, уменьшение сопротивления конденсаторов на частотах высших гармоник.

При искажении синусоидальности кривой напряжения на зажимах батареи конденсаторов в их диэлектрике появляются дополнительные потери активной мощности [7]:

$$\Delta P_{\text{доп}} = \sum_{n=2}^{40} \Delta p_0 \cdot \omega \cdot C \cdot n \cdot U_n^2, \quad (5)$$

где: Δp_0 – удельные потери на основной частоте;
 C – емкость;
 n – номер гармоники;
 ω – угловая частота;
 U_n – напряжение n-гармоники.

Из-за дополнительных потерь, вызываемых токами ВГ, в России конденсаторные батареи проектируют так чтобы они выдерживали токовую

перегрузку в 30%, в то время как в США этот параметр достигает 80% [7].

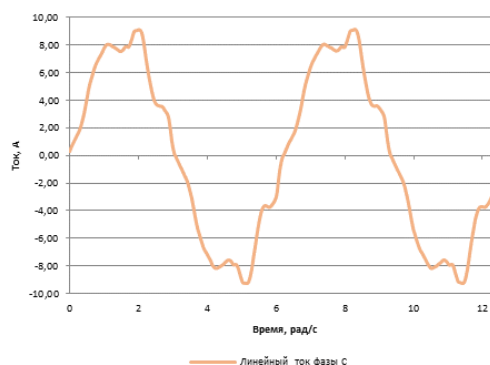


Рис. 8. Осциллограмма линейного тока конденсаторной установки

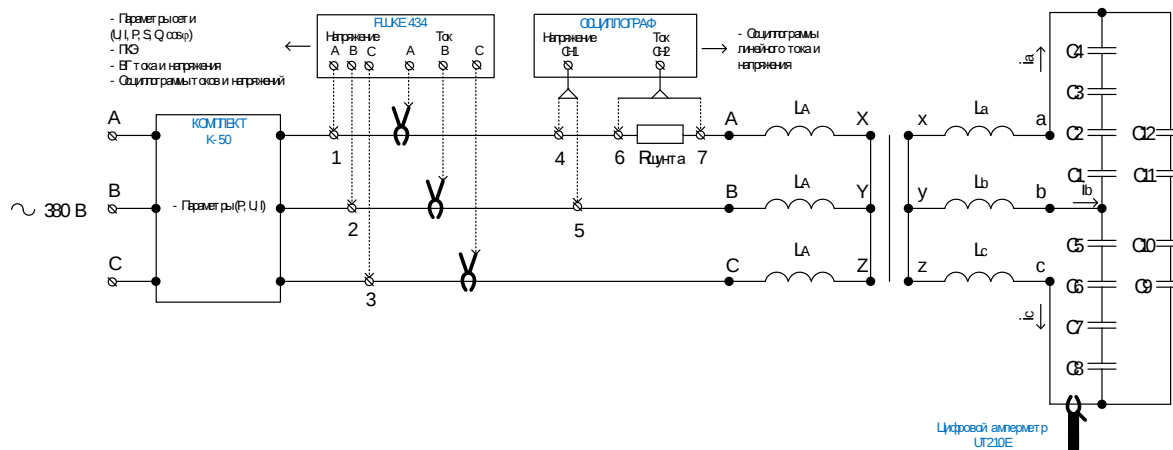


Рис. 7. Схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник конденсаторной установки

Закключение

На основе выполненных расчётных и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований высших гармонических в системах электроснабжения объектов морской индустрии.

2. Приведены результаты измерений высших гармоник тока, эмиттируемых в электрическую сеть нелинейными нагрузками:

2.1. Сварочными аппаратами. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в точке передачи энергии (K_i) составил 104 % при максимальных нагрузках и 29 % при средних.

2.2. Светодиодными лампами. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока первой лампы в точке передачи энергии (K_i) составил 34 %. Суммарный коэффициент гармонических

составляющих тока второй лампы в точке передачи энергии (K_i) составил 124 %.

2.3. Конденсаторной установкой. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в точке передачи энергии K_i составил 15 %.

При этом в электрическую сеть эмиттируется весь спектр высших гармонических, преобладающими из которых являются 3, 5, 7 гармоники, замыкающиеся по цепям нулевой, обратной и прямой последовательностей. Это приводит к возникновению дополнительных потерь в оборудовании, обусловленных высшими гармониками.

Результаты исследований могут быть использованы при реструктуризации систем электроснабжения судостроительных заводов для обеспечения показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ.

Литература

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014, 19 с.

2. Белей В.Ф., Никишин А.Ю., Паршина В.Ф., Шабалин Л.Д. Энергосберегающие технологии в системах электроснабжения: учебное пособие для вузов / Под. Ред. В.Ф. Белей. – Калининград: Издательство КГТУ, 2021. – 102 с.
3. Гамазин С.И., Кудрин Б. И., Цырук С.А. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий. – М.: МЭИ, 2010. – 745 с.
4. Шейнихович В.В., Климанов О.Н., Пайкин Ю.И., Зубарев Ю.Я. Качество электрической энергии на судах: справочник / В.В. Шейнихович, О.Н. Климанов, Ю.И. Пайкин, Ю.Я. Зубарев. – Л.: Судостроение, – 1988. – 160 с.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984, – 160 с.
6. Белей В.Ф. Компактные люминесцентные лампы: электрические характеристики, проблемы электромагнитной совместимости // Электротехника, – 2002. – № 7, – 48-51 с.
7. Белей В.Ф., Решетников Г.А., Коротких К.В. Исследование высших гармонических составляющих тока и напряжения и их влияния на функционирование судового электрооборудования // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4, т. 4. – 34-43 с.

References

1. State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 19 p. (In Russian).
2. Beley V.F., Nikishin A.Yu., Parshina V.F., Shabalin L.D. Energoberegayushchiye tekhnologii v sistemakh elektrosnabzheniya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Energy-saving technologies in power supply systems: a textbook for universities]. V.F. Beley V.F. ed. Kaliningrad, KSTU Publishing House, 2021, 102 p.
3. Gamazin S.I., Kudrin B.I., Tsyruk S.A. Spravochnik po energosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu promyshlennykh predpriyatiy i obshchestvennykh zdaniy [Reference book on power supply and electrical equipment of industrial enterprises and public buildings]. Moscow, MEI Publishing House, 2010, 745 p.
4. Sheinikhovich V.V., Klimanov O.N., Paykin Yu.I., Zubarev Yu.Ya. Kachestvo elektricheskoy energii na sudakh: spravochnik [The quality of electrical energy on ships: a reference book]. St. Petersburg, Sudostroyeniye Publ., 1988, 160 p.
5. Zhezhelenko I. V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrocnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., vol. 2, 1984, 160 p.
6. Beley V.F. Kompaktnye lyuminescentnyye lampy: elektricheskie kharakteristiki, problemy elektromagnitnoy sovmestimosti [Compact fluorescent lamps: electrical characteristics, electromagnetic compatibility issues], Elektrotehnika Publ., 2002, № 7, 48-51 p.
7. Beley V.F., Reshetnikov G.A., Korotkikh K.V. Issledovanie vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka i napryazheniya i ikh vliyaniya na funktsionirovaniye sudovogo elektrooborudovaniya [Research of higher harmonics and their influence on the functioning of shipboard electrical equipment], Marine intellectual technologies, 2021, № 4, part 4, 34-43 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белей Валерий Феодосиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley, Dr.Sci.(Eng), professor, head of the Energy Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Кирилл Викторович Коротких, аспирант кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kirillkorotkikh@bk.ru

Kirill V. Korotkikh, PhD student of the Energy Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: kirillkorotkikh@bk.ru

Василий Денисович Самарин, магистрант кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: w.d.samarin@mail.ru

Vasiliy D. Samarin, Master Degree student of the Energy Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: w.d.samarin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

Научная статья

УДК 621.3.015.38

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.067>**Перенапряжения при однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью в условиях несимметрии фазных емкостей**И.Е. Кажекин¹ kazhekin@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация В условиях постоянного роста количества электрооборудования на судах увеличивается и протяженность кабельных линий. Это приводит к увеличению токов однофазных замыканий. Для обоснования выбора способа защиты необходимо исследовать основные последствия применения возможных вариантов. Основным способом уменьшения токов однофазных замыканий при сохранении показателей бесперебойности электропитания потребителей является перевод электрической сети из режима изолированной нейтрали в режим ее заземления через реактор. Для такого режима нейтрали необходимо обеспечение симметрии фазных емкостей, что в условиях судовых электросетей практически недостижимо. Работа несимметричной сети в режиме компенсированной нейтрали в первую очередь отражается на перенапряжениях. В статье рассмотрен процесс формирования перенапряжений при однофазных замыканиях в низковольтных электросетях с компенсированной нейтралью в условиях несимметрии фазных емкостей. На основе аналитических исследований и численных экспериментов выявлены основные закономерности в развитии максимальных кратностей дуговых перенапряжений.

Ключевые слова: Перенапряжения, несимметрия, однофазные замыкания, фазные емкости, судовые электросети, компенсированная нейтраль, токи замыкания.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Для цитирования Кажекин И.Е. Перенапряжения при однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью в условиях несимметрии фазных емкостей. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 86—91.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.067>**Overvoltage by single-phase faults in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral in conditions of asymmetry of phase capacities**Ilya E. Kazhekin¹ kazhekin@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In the context of a constant increase in the number of electrical equipment on ships, the length of shipboard cable lines is also increasing. This leads to an increase in single-phase fault currents. To justify the choice of protection method against this type of faults, it is necessary to investigate the main consequences of various protective systems application. The main way to reduce the currents of single-phase faults while maintaining the uninterrupted power supply to consumers is to change the neutral mode of the electrical network from isolated to grounded through the reactor. In the case of such a neutral mode, it is necessary to ensure the symmetry of the phase capacitances, which is practically unattainable in the conditions of shipboard electrical networks. The operation of an unbalanced network in the compensated neutral mode primarily affects overvoltages. The article considers the process of overvoltage formation during single-phase short circuits in low-voltage electrical networks with a compensated neutral under conditions of phase capacitance asymmetry. On the basis of analytical studies and computational experiments, the main regularities in the development of maximum arc overvoltage multiplicity are revealed.

Key words: Overvoltage, asymmetry, single-phase faults, phase capacitances, ship electrical networks, compensated neutral, fault currents.

Financial Support: The work was supported financially by the Federal Agency for Fisheries (contract no. 122030900054-0).

For citation: Ilya E. Kazhekin, Overvoltage by single-phase faults in low-voltage ship electrical networks with compensated neutral in conditions of asymmetry of phase capacities. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 86—91.

Введение

Одним из основных требований, предъявляемым к защите бортовых электроустановок от однофазных замыканий и прикосновений является сохранение электропитания ответственных потребителей при

контакте фазы с корпусом судна. Для решения этой задачи в бортовых электросетях используется режим изолированной нейтрали. При таком режиме нейтрали ток однофазного замыкания зависит от величины фазной емкости электросети, что позволяет обеспечить малые значения токов в месте замыкания при небольшой суммарной

протяженности кабельных линий. Однако, на крупных объектах морской техники, оснащенных большим количеством электрооборудования и разветвленными электрическими сетями возможно формирование значительных фазных емкостей между токопроводами и корпусом судна. Это может привести к тому, что величина токов однофазных замыканий на таких объектах превысит электро- и пожароопасные значения. В этих условиях наиболее рациональным способом обеспечения безопасности бортовых электрических сетей без нарушения бесперебойности электропитания потребителей может стать их перевод в режим компенсированной нейтрали. В этом случае нейтральная точка электрической сети соединяется с корпусом судна через реактор, который создает индуктивную составляющую тока в месте замыкания. Эта составляющая компенсирует ток однофазного замыкания, который имеет преимущественно емкостной характер.

Изменение режима нейтрали оказывает влияние не только на величину тока замыкания, но и на перенапряжения, которые возникают при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна. Эти перенапряжения способствуют развитию однофазных замыканий в более опасные виды повреждений. В электросетях с симметричными фазными емкостями и точной настройке в резонанс с ними реактора переход от изолированной нейтрали к компенсированной сопровождается снижением перенапряжений. Однако, в условиях судовых электросетей оценить влияние заземления нейтрали на перенапряжения затруднительно. Это обусловлено следующими особенностями судовых электросетей:

- неконтролируемая несимметрия фазных емкостей [1, 2];
- наличие гальванической развязки в цепи реактора, что изменяет механизм формирования перенапряжений при неустойчивых замыканиях фазы на корпус [3-6].

Целью работы является оценка наибольших перенапряжений при неустойчивом замыкании фазы на корпус в судовых электросетях с несимметрией фазных емкостей.

1. Методика исследований

Для оценки наибольших перенапряжений при однофазных замыканиях, как правило, используются три классические теории: Петерсена [7,8]; Петерса и Слепяна [9]; Беякова [10].

Первые две теории на основе представлений о гашении и зажигании заземляющей дуги в определенные моменты времени позволяют провести расчеты максимальных перенапряжений. Третья теория связывает максимальные перенапряжения со свойствами дугового промежутка, а именно напряжением пробоя в первые мгновения после гашения дуги.

В наибольшей степени влияние реактора и отклонения значений фазных емкостей друг от друга могут быть учтены при анализе процессов на основе теории Петерса и Слепяна. Согласно этой теории заземляющая дуга горит половину периода и ее погасение происходит при переходе через нулевое значение принужденной составляющей тока замыкания. К этому моменту свободные переходные

процессы заканчиваются. Повторное зажигание дуги произойдет только при достижении напряжением поврежденной фазы своего наибольшего значения. В электросетях с изолированной нейтралью этот момент наступает через половину периода частоты сети. При компенсированной нейтрали этот отрезок времени зависит от параметров устройства заземления нейтрали и электросети.

Такое представление о поведении дуги используется только для определения наиболее неблагоприятных условий развития перенапряжений, когда формируются их наибольшие значения. Его экспериментальное воспроизведение затруднительно, поэтому оценка достоверности полученных теоретических результатов осуществлялась путем сравнения с данными полученными в результате численных экспериментов. Численные эксперименты проведены при помощи математической модели судовой электросети в режиме компенсированной нейтрали. Однофазные замыкания в ней имитировались при помощи неустойчивого контакта, коммутируемого в заданные моменты времени.

2. Описание процессов после зажигания заземляющей дуги

Процессы, протекающие при неустойчивых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросистемах с компенсированной нейтралью могут быть проанализированы на основе схемы, приведенной на рис.1.

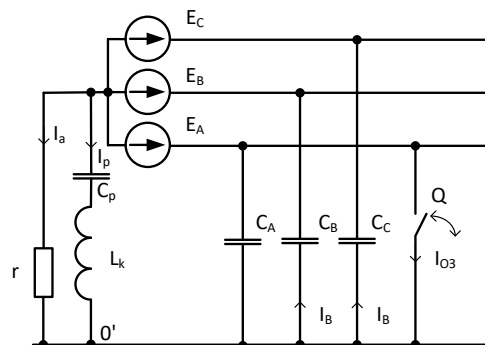


Рис. 1. Схема судовой электросети с компенсированной нейтралью при однофазном замыкании

r – эквивалентное активное сопротивление электрической сети относительно корпуса судна; C_p – емкость для гальванической развязки; L_k – индуктивность реактора; C_A, C_B, C_C – фазные емкости электросети.

После зажигания заземляющей дуги между одной из фаз (на рис. 1 фаза A) и корпусом судна напряжение на изоляции неповрежденных фаз (на рис. 1 фазы B и C) изменится следующим образом $u_B(t) = e_B(t) - e_A(t) + [e_A(t_3) + u_N]e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t)$, (1) где $e_B(t), e_A(t)$ – ЭДС неповрежденной и поврежденной фаз; t_3 – момент замыкания; δ – коэффициент затухания; ω_0 – частота свободных колебаний после зажигания дуги.

Наибольшие перенапряжения согласно теории Петерса и Слепяна происходят при замыкании в момент когда ЭДС поврежденной фазы достигает своего амплитудного значения. В этом случае сумма

первых двух слагаемых выражения (1) будут равны $1.5 E_\phi$, где E_ϕ – амплитуда фазного напряжения. Третье слагаемое в выражении (1) представляет собой свободную составляющую напряжения. Ее амплитуда во многом определяется напряжением на нейтрали перед зажиганием дуги.

Ток однофазного замыкания изменяется согласно выражению:

$$i_{O3}(t) = i_{прин}(t) + i_{св}(t), \quad (2)$$

Свободная составляющая этого тока достаточно быстро затухает и не оказывает влияние на дальнейшее развитие процесса формирования перенапряжений. Принужденная составляющая тока может быть представлена как сумма следующих токов:

- ток реактора;
- ток, создаваемый фазными емкостями электросети;
- ток, создаваемый поперечной активной проводимостью электросети, включая реактор.

Распределение токов в упрощенной схеме бортовой электросети с компенсированной нейтралью продемонстрировано на рис. 1. Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании, составленная согласно этой схеме, представлена на рис. 2.

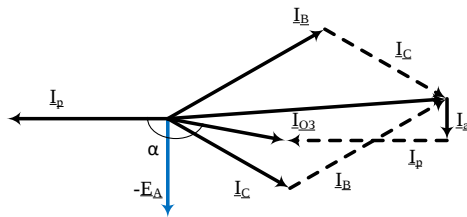


Рис. 2. Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании

Из векторной диаграммы видно, что ток, обусловленный фазными емкостями электросети отличается от емкостного тока в симметричной электросети. Это отличие может быть учтено следующим выражением

$$I_c = I_{Cсим}(n - 1), \quad (3)$$

где n – степень несимметрии фазных емкостей реактора [11]; $I_{Cсим}$ – емкостной ток однофазного замыкания, определяемый $I_{Cсим} = j\omega C_\Sigma E_\phi$.

Ток реактора определяется степенью расстройки компенсатора. Его взаимосвязь с емкостным током может быть установлена следующим образом

$$I_p = I_{Cсим}(1 - \nu), \quad (4)$$

где ν – степень расстройки реактора [11].

Ток вызванный активной проводимостью электрической сети:

$$I_a = I_{Cсим} d \nu, \quad (5)$$

где d – коэффициент демпфирования электросети [11].

Суммарный ток в месте замыкания может быть представлен следующим образом.

$$I_{O3} = I_p \left(\frac{d\nu + n - \nu}{1 - \nu} \right). \quad (6)$$

Выражение (5) позволяет установить значение индуктивного тока реактора, при котором происходит гашение заземляющей дуги. Это значение равно

$$i_p(t_r) = I_{pm} \sin(-\arg(\vec{I}_p, \vec{I}_{O3})). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что при гашении дуги ток, протекающий через реактор, имеет значение определяемое степенью несимметрии фазных емкостей, коэффициентом демпфирования электросети и степенью расстройки реактора с емкостью электросети.

3. Описание процессов после гашения заземляющей дуги

Амплитуда свободной составляющей напряжения на неповрежденной фазе во многом зависит от процессов, протекающих после гашения дуги. Именно эти процессы формируют напряжения u_N в выражении (1). Это напряжение состоит из принужденной составляющей, обусловленной несимметрией, и свободной составляющей.

$$u_N(t) = U_{Nкол} \cdot e^{-\delta_r \cdot (t - t_r)} \cdot \sin(\omega_{0r} t + \varphi_u) + u_{Nпр}(t),$$

где $U_{Nкол}$ – амплитуда свободных колебаний напряжения на нейтрали после гашения дуги; δ_r – коэффициент затухания после гашения дуги; ω_{0r} – частота собственных колебаний после гашения дуги; φ_u – начальная фаза напряжения колебаний после гашения дуги; $u_{Nпр}(t)$ – принужденная составляющая напряжения смещения нейтрали; t_r – момент гашения дуги.

Амплитуда возникших в результате гашения дуги колебаний напряжения между нейтралью электросети и корпусом $U_{Nкол}$ может быть определена путем решения следующей системы уравнений, составленной на основе первого и второго законов коммутации.

$$\begin{cases} U_{Nкол} \cdot \sin(\varphi_u) = \Delta u_N, \\ U_{Nкол} \cdot \omega_{0r} \cdot \cos(\varphi_u) - U_{Nкол} \cdot \delta_r \cdot \sin(\varphi_u) = C_\phi \cdot \Delta i_p. \end{cases} \quad (8)$$

где $\Delta u_N = u_N(t_r) - u_{Nпр}(t_r)$ – разность между напряжением на нейтрали до гашения дуги $u_N(t_r)$ и принужденной составляющей напряжения на нейтрали после гашения дуги $u_{Nпр}(t_r)$; $\Delta i_p = i_p(t_r) - i_{pпр}(t_r)$ – разность между током через реактор до гашения дуги $i_p(t_r)$ и принужденной составляющей тока через реактор после гашения дуги $i_{pпр}(t_r)$.

Решение системы уравнений (8) позволяет получить следующие выражения для определения амплитуды и начальной фазы колебаний напряжения на нейтрали:

$$U_{Nкол} = \frac{\sqrt{(\Delta u_N \cdot C_\phi \cdot \delta_r + \Delta i_p)^2 + (\Delta u_N \cdot C_\phi \cdot \omega_{0r})^2}}{C_\phi \cdot \omega_{0r}}, \quad (9)$$

$$\varphi_u = \arctg \left(\frac{\Delta u_N \cdot C_\phi \cdot \omega_{0r}}{\Delta u_N \cdot C_\phi \cdot \delta_r + \Delta i_p} \right). \quad (10)$$

Ток через реактор после гашения дуги изменяется согласно следующим выражениям:

$$i_k(t) = I_{кол} \cdot e^{-\delta_r \cdot t} \cdot \sin(\omega_{0r} t + \varphi_i), \quad (11)$$

где $I_{кол}$ – амплитуда тока через ДГР после гашения дуги; φ_i – начальная фаза напряжения колебаний.

$$\varphi_i = \arctg \left(\frac{\Delta i_p \cdot L_k \cdot \omega_{0r}}{\Delta i_p \cdot L_k \cdot \delta_r + \Delta u_N} \right), \quad (12)$$

где L_k – индуктивность реактора.

$$I_{кол} = \frac{\sqrt{(\Delta i_p \cdot L_k \cdot \delta_r + \Delta u_N)^2 + (\Delta i_p \cdot L_k \cdot \omega_{0r})^2}}{L_k \cdot \omega_{0r}}. \quad (13)$$

Как следует из (9), (13) и (14) амплитуда колебаний напряжения на нейтрали и тока реактора зависят от величины Δu_N . Ее значение определяется модулем вектора напряжения на нейтрали $U_{Nпр}$. Для

электрической сети с компенсированной нейтралью он будет равен

$$|U_{Nпр}| = \left| n \left(1 + j \frac{X}{R} \right) \right| E_{\phi}, \quad (14)$$

где X , R – индуктивное и активное сопротивления реактора на основной частоте; E_{ϕ} – фазная ЭДС электросети.

Таким образом, видно, что несимметрия фазных емкостей приводит к увеличению амплитуд колебаний в контуре нулевой последовательности после гашения заземляющей дуги, что может стать причиной повышения перенапряжений.

4. Оценка наибольших перенапряжений

Модель судовой электросети, используемая в исследованиях, приведена на рис. 3.

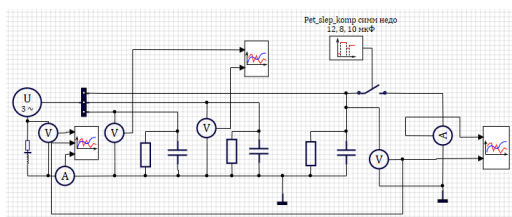


Рис. 3. Модель судовой электросети с компенсированной нейтралью при однофазном замыкании

Достоверность модели оценивалась сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными. На рис. 4 приведены примеры осциллограмм тока реактора и напряжения поврежденной фазы, полученные в ходе эксперимента при неустойчивом однофазном замыкании.

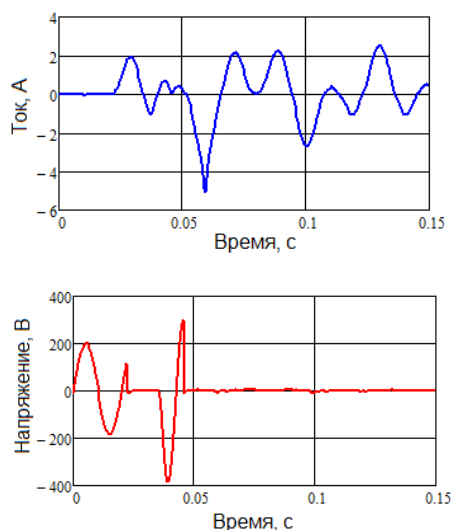


Рис. 4. Экспериментально зарегистрированные осциллограммы тока реактора и напряжения поврежденной фазы

В ходе эксперимента коммутации фазы с корпусом судна проводились в случайные моменты времени. Используя значения этих моментов времени, а также начальные условия переходных процессов проведен расчет по представленным выше выражениям, а также при помощи модели получены осциллограммы. Результаты расчетов и моделирования оказались весьма близкими к экспериментальным данным, что свидетельствует о достаточной достоверности предложенных описаний процессов как при зажигании заземляющей дуги, так и при ее гашении. Вид осциллограмм, полученных при помощи модели продемонстрирован на рис. 5.

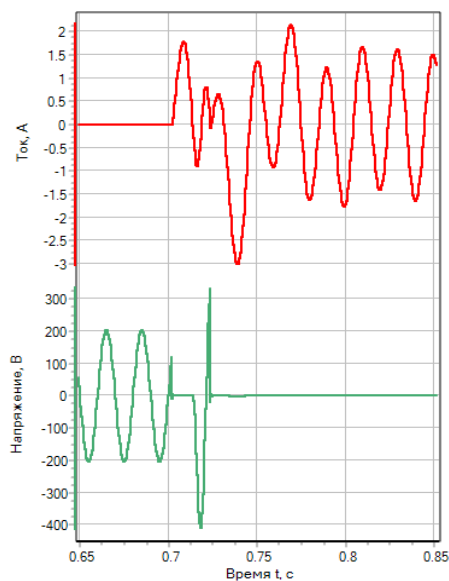


Рис. 5. Полученные при помощи модели осциллограммы тока реактора и напряжения поврежденной фазы

Имеющиеся расхождения в осциллограммах, полученных расчетным и экспериментальным путем, объясняется использованием в эксперименте реактора, обладающего нелинейной характеристикой. При расчетах его нелинейность не учитывалась.

Моделирование процессов согласно описанному выше поведению заземляющей дуги показало, что после ее гашения напряжение на поврежденной фазе может восстанавливаться несколько периодов. К этому моменту времени исчезают свободные составляющие и значения токов и напряжений при последующих замыканиях практически не зависят от процессов в предыдущих циклах зажигания и гашения заземляющей дуги (рис. 6).

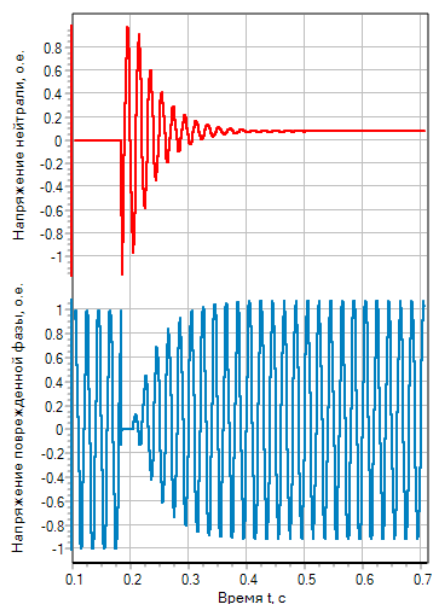


Рис. 6 – Напряжения на нейтрали и поврежденной фазе при симметрии фазных емкостей и точной настройке реактора в резонанс

Такое развитие процессов приводит к формированию максимальных перенапряжений уже после нескольких первых циклов зажигания и гашения дуги, что продемонстрировано на рис. 7.

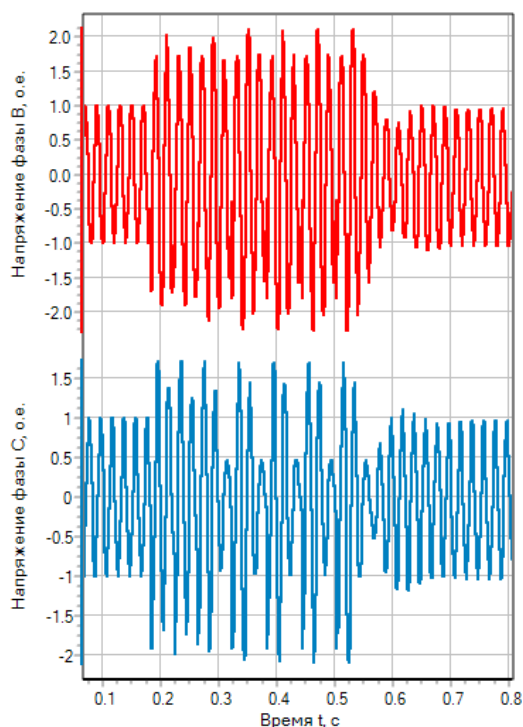


Рис. 7. Изменение напряжений на неповрежденных фазах при неустойчивых однофазных замыканиях

При отклонениях значений фазных емкостей друг от друга изменяются напряжения между фазами и корпусом судна в режиме без однофазного замыкания. Для определения наиболее неблагоприятного сочетания несимметричных емкостей серия замыканий моделировалась поочередно на каждой из фаз. Вычислительные эксперименты показали, что появление несимметрии фазных емкостей приводит к увеличению максимальных перенапряжений. Ее влияние можно оценить по данным таблицы 1, в которой представлены наибольшие кратности перенапряжений, полученные описанным способом при различных сочетаниях параметров электросети с компенсированной нейтралью.

Таблица 1

Результаты оценки максимальных перенапряжений

Степень расстройки реактора, %	Степень несимметрии, %	U_{max} , о.е.
34 % (перекомпенсация)	19%	2.55
	0	2.10
0 (точная настройка)	14%	2.47
	0	1.88
-20 % (недокомпенсация)	12%	2.13
	0	1.95

Как видно из таблицы 1, при развитии дуговых процессов согласно теории Петерса и Слепяна несимметрия фазных емкостей способствует увеличению дуговых перенапряжений. Однако это увеличение в проведенных численных экспериментах превысило 30 %, что сопоставимо с увеличением постоянно действующего фазного напряжения, которое при этих же параметрах электрической сети достигло 50 %.

Заключение

Несимметрия фазных емкостей способствует увеличению перенапряжений при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью. В ходе описанных вычислительных экспериментов зафиксировано увеличение перенапряжений более чем на 30 %.

Наибольший прирост перенапряжений из-за несимметрии приходится на сочетание параметров, соответствующее точной настройке реактора в резонанс с суммарной фазной емкостью электросети. В этом режиме несимметрия фазных емкостей в большей степени отражается на повышении напряжения между поврежденной фазой и корпусом судна до возникновения замыкания.

Полученные в ходе вычислительных экспериментов закономерности в полной мере отражают закономерности выявленные в ходе аналитических исследований процессов развития перенапряжений с учетом несимметрии фазных емкостей электросети.

Литература

1. Ксенофонтов А.П., Шестопапов Ю.А., Островский В.Я. Защитные устройства в судовых и береговых электроустановках рыбной промышленности. М., «Легкая и пищевая промышленность», 1984, 255 с.

2. Благинин В. А., Кажехин И.Е., Юсуп В.М., Москалюк А.М., Сиренко Д.П. Результаты длительных натурных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем. Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015, № 1, С. 124-129.
3. Кажехин И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью. Морские интеллектуальные технологии. 2019, Т. 4, № 4 (46), С. 83-87.
4. Иванов Е.А., Кузнецов С.Е. Методы контроля изоляции судовых электроэнергетических систем. СПб.: «Элмор», 1999, 80 с..
5. Никифоровский Н.Н., Брунав Я.П., Татьяначенко Ю.Г. Электропожаробезопасность судовых электрических систем. Л.: «Судостроение», 1978, 120 с.
6. Кажехин И.Е. Формирование максимальных перенапряжений при возникновении феррорезонансных процессов во время дуговых однофазных замыканий в низковольтных судовых электросистемах. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология., 2020, № 1, С. 115-124.
7. Petersen W. Der aussetzende Erdschuss. ETZ, 1916, N. 37, S. 493-495
8. Petersen W. Der aussetzende Erdschuss. ETZ, 1916, N. 38, S. 553-555.
9. Peters I.E., Slepian J. Voltage Induced by Arcing Ground. Tr. AIEE, 1923, №4, P. 478-489.
10. Беляков Н.Н. Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Электричество, 1957, № 5, С. 31-36
11. РД 34.20.179. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ

References

1. Ksenofontov A.P., Shestopalov Yu.A., Ostrovskiy V.Ya. Zashchitnye ustroystva v sudovykh i beregovykh elektroustanovkakh rybnoy promyshlennosti [Protective devices in ship and shore electrical installations of the fishing industry]. M., «Legkaya i pishchevaya promyshlennost'», 1984, 255 s.
2. Blagin V. A., Kazhekin I.E., Yusup V.M., Moskalyuk A.M., Sirenko D.P. Rezul'taty dlitel'nykh naturnykh ispytaniy ustroystva zashchitnogo zazemleniya neytrali dlya sudovykh elektrosistem [The results of long-term full-scale tests of the neutral protective earthing device for ship electrical systems]. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015, № 1, S. 124-129.
3. Kazhekin I.E. Opisanie protsessov pri dugovykh odnofaznykh zamykaniyakh v nizkovol'tnykh sudovykh elektrosetyakh s kompensirovannoy neytral'yu [Description of processes in case of single-phase arc faults in low-voltage ship power networks with compensated neutral]. Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2019, T. 4, № 4 (46), S. 83-87.
4. Ivanov E.A., Kuznetsov S.E. Metody kontrolya izolyatsii sudovykh elektroenergeticheskikh system [Methods for monitoring the insulation of ship electrical power systems]. SPb.: «Elmor», 1999, 80 s..
5. Nikiforovskiy N.N., Brunav Ya.P., Tat'yanchenko Yu.G. Elektropozharobezopasnost' sudovykh elektricheskikh system [Electrical fire safety of ship electrical systems]. L.: «Sudostroenie», 1978, 120 s.
6. Kazhekin I.E. Formirovaniye maksimal'nykh perenapryazheniy pri vozniknovenii ferrozonansnykh protsessov vo vremya dugovykh odnofaznykh zamykaniy v nizkovol'tnykh sudovykh elektrosistemakh [Formation of maximum overvoltages in the event of ferroresonance processes during single-phase arc faults in low-voltage ship electrical systems]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya., 2020, № 1, S. 115-124.
7. Petersen W. Der aussetzende Erdschuss [The intermittent ground shot]. ETZ, 1916, N. 37, S. 493-495
8. Petersen W. Der aussetzende Erdschuss [The intermittent ground shot]. ETZ, 1916, N. 38, S. 553-555.
9. Peters I.E., Slepian J. Voltage Induced by Arcing Ground. Tr. AIEE, 1923, №4, P. 478-489.
10. Belyakov N.N. Issledovaniya perenapryazheniy pri dugovykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh 6-10 kV s izolirovannoy neytral'yu [Studies of overvoltages in case of arc faults to the ground in 6-10 kV networks with isolated neutral]. Elektrichestvo, 1957, № 5, S. 31-36
11. RD 34.20.179. Tipovaya instruktsiya po kompensatsii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-35 kV [Typical instruction for compensation of capacitive earth fault current in electrical networks 6-35 kV].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Евгеньевич Кажехин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Ilya E. Kazhekin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2022.

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

Научная статья

УДК 57.08

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.068>

Модернизированные варианты дночерпателя Экмана-Берджи с дополнительным сенсорным и вычислительным оборудованием для автоматизации захвата и оценивания качества пробы

М.О. Дудаков¹ mike814@yandex.ru, Д.С. Дудакова¹ judina-d@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация В работе обсуждаются проблемы отбора проб при гидробиологических исследованиях, а также существующие механические средства, используемые для этой цели. Простота функционирования и надежность разработанных ранее дночерпателей удовлетворяют специалистов, но низкая вероятность захвата пробы с первого раза приводит к необходимости полного подъема дночерпателя с глубины и повторного сброса. Этот фактор существенно сказывается на скорости работы, особенно при картировании акваторий с большими глубинами. Приведено описание двух вариантов модернизированных дночерпателей Экмана-Берджи. Первый вариант имеет систему электронно-механического привода, имитирующую приход посылы дночерпателя, а также видеокамеру с подсветкой для визуального контроля постановки дночерпателя на грунт и его характеристик. Данный вариант существенно увеличивает себестоимость модернизации дночерпателя, а от пользователя требует дополнительных профессиональных навыков. Описан бюджетный вариант дночерпателя без видеокамеры, но с дополнительным сенсорным и вычислительным оборудованием, которое в автоматическом режиме принимает решение о захвате пробы и существенно экономит время работы специалистов за счет снижения вероятности подъема захлопнувшегося дночерпателя с недостаточным объемом донного грунта. Оба варианта дночерпателей успешно эксплуатировались в ходе двух сезонов во время экспедиций по Ладожскому озеру.

Ключевые слова: дночерпатель, пробоотборник, отбор проб, гидробиологические исследования, картирование акваторий, интеллектуализация, беспроводные средства, видеомониторинг, датчики

Для цитирования Дудаков М.О., Дудакова Д.С. Модернизированные варианты дночерпателя Экмана-Берджи с дополнительным сенсорным и вычислительным оборудованием для автоматизации захвата и оценивания качества пробы, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 92—99.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.068>

Modernized versions of the Ekman-Burgey bottom grab with additional sensor and computing equipment for automating the capture and evaluation of sample quality

Mikhail O. Dudakov¹ mike814@yandex.ru, Dina S. Dudakova¹ judina-d@yandex.ru

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the problems of sampling in hydrobiological studies, as well as the existing mechanical means used for this purpose. The ease of operation and reliability of previously developed bottom grabs satisfy specialists, but the low probability of capturing a sample from the first time leads to the need to completely lift the bottom grab from the depth and re-dump. This factor significantly affects the speed of work, especially when mapping water areas with great depths. The description of two variants of modernized Ekman-Burgey bottom grabs is given. The first option has an electronic-mechanical drive system that simulates the arrival of the bottom grab message, as well as a video camera with illumination for visual control of the bottom grab placement on the ground and its characteristics. This option significantly increases the cost of upgrading the bottom grab, and requires additional professional skills from the user. A budget version of a grab without a video camera is described, but with additional sensor and computing equipment, which automatically makes a decision to capture a sample and significantly saves time for specialists by reducing the likelihood of lifting a slammed grab with insufficient volume of bottom soil. Both variants of bottom grabs were successfully operated during two seasons during expeditions on Lake Ladoga.

Key words: bottom grab, sampler, sampling, hydrobiological research, mapping of water areas, intellectualization, wireless means, video monitoring, sensors

For citation: Mikhail O. Dudakov, Dina S. Dudakova, Modernized versions of the Ekman-Burgey bottom grab with additional sensor and computing equipment for automating the capture and evaluation of sample quality, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 92—99.

Введение

Одним из основных первичных этапов при исследованиях в научной, природоохранной, рыбохозяйственной, геологоразведочной и других видов деятельности, связанных с использованием водных ресурсов, является отбор проб воды и донных отложений [1]. Качество получаемых проб и скорость их отбора являются одними из главных характеристик, влияющих на стоимость экспедиций. Сокращение скорости взятия каждой пробы особенно актуально на глубоководных водоемах в задачах, где требуется провести анализ большой территории дна или воды в акватории.

Учитывая сложные условия эксплуатации механизмов отбора проб, одной из главных их характеристик является надежность и простота функционирования. Поэтому, например, дночерпатели, разработанные более 50 лет назад не потеряли свою актуальность и их механическая конструкция не претерпела существенных изменений [2, 3, 4].

В работе [5] предложен газодинамический пробоотборник, где вертикальная траектория падения грейферным ковшом вниз обеспечивается газовым баллоном, а применение гидрида лития в качестве газогенерирующего вещества после срабатывания приводит к самостоятельному всплытию на поверхность моря.

В работе [6] проводится анализ современных средств сбора планктонных и бентосных проб, подчеркивается актуальность проблемы потери части пробы, захватываемой дночерпателем, на участках со сложным рельефом дна. Также отмечается перспективность установки на пробоотборник видеокамеры для визуального осмотра рельефа дна и применения сенсоров для контроля вертикального спуска дночерпателя и положения створок его ковша.

Актуальность постоянного гидробиологического мониторинга водоемов с применением дистанционных методов сбора видеоданных и технологий искусственного интеллекта для обработки полученных изображений обсуждается в работах [7, 8]. Беспроводные дистанционные средства регистрации данных обеспечивают сокращение затрат на установку и позволяют проводить анализ динамики изменения параметров биологических и физических структур в исследуемой водной среде.

В работе [9] обсуждается задача картирования биоценозов в морских акваториях, требующая многократных серий отбора проб для получения надежных сведений о распределении организмов макробентоса.

Приведенный краткий анализ научных публикаций в области разработки и применения способов взятия проб при гидробиологических исследованиях показал актуальность задачи интеллектуализации ручных механизмов захвата проб воды и донных отложений. Формальная постановка задачи данного исследования была сформулирована следующим образом. Имеется механизированный дночерпатель с функциями

автоматизированного срабатывания ковшей, дополнительно оснащенный сенсорным и вычислительным оборудованием, необходимо разработать программно-алгоритмическое обеспечение микроконтроллера, отвечающего за автоматический захват пробы на основе анализа показаний акселерометра и другого встроенного сенсорного оборудования.

Далее в статье описаны два варианта модифицированных дночерпателей Экмана-Берджи с автоматизированными функциями оценивания вертикального вхождения в грунт и объема потенциально захватываемой пробы перед захлопыванием створок ковша. Приведены экспериментальные результаты опытной эксплуатации дночерпателя во время экспедиции в акватории Ладожского озера.

1. Описание варианта модернизированного дночерпателя с видеокамерой

Дночерпатель Экмана-Берджи широко используется при исследовании донных осадков водоемов, являясь одним из основных средств отбора проб. Использование прибора входит в большое число отработанных методик по биологии, гидрологии, экологии и др. Прибор является простым и надёжным инструментом исследований, при этом у него есть целый ряд критических проблем, включая следующие:

- Следствием использования для срабатывания прибора посылы, скользящего по тросу, является значительное усложнение работы при волнении на больших глубинах; от пользователя требуется очень высокая квалификация и опыт (для одномоментного опускания дночерпателя на дно и прихода посылы приходится использовать секундомер)

- При попадании на скальный, каменистый грунт отбор будет невозможен, но пользователь не будет этого знать и будет предпринимать попытки, теряя время.

- При отклонении дночерпателя от вертикали захватывается площадь меньшая предусмотренной при вертикальной постановке прибора на грунт, учитываемой при пересчетах на кв.м, что сказывается на достоверности получаемых данных при анализе дночерпательных проб.

- При работе на подводных склонах нет точной глубины, с которой взята проба, что критично для биологических исследований.

Эти проблемы были решены при модификации прибора за счет применения дополнительного электромеханического и сенсорного оборудования (рис 1).

Модификация заключается в следующем. Создана система электронно-механического привода, имитирующая приход посылы дночерпателя (массивная деталь скользит по валу и при прохождении дистанции в 30 см набирает необходимую скорость), управляемая с пульта. При этом вся механическая часть прибора осталась без изменений, что позволяет использовать наработанные методики и на модифицированном приборе.



Рис. 1. Текущий вариант модифицированного дночерпателя с основными модулями: 1 - имитатор посылы; 2 – блок электроники; 3 –сервопривод

Произведена установка видеокамеры с подсветкой для визуального контроля постановки дночерпателя на грунт, и, что самое главное, характеристик самого грунта. Однако данная опция требует закупки монитора, дорогостоящего кабеля, поэтому существенно увеличивает себестоимость модернизации дночерпателя, а от пользователя требует дополнительных профессиональных навыков. Поэтому установка видеокамеры пока не рассматривается в разрабатываемом новом опытном образце дночерпателя.

Выполнена установка акселерометра LIS DSH для оперативного контроля отклонения оси прибора от вертикали, что значительно сокращает количество неудачных попыток отбора грунта и гарантирует захват площади донного осадка, соответствующей рабочей площади дночерпателя в вертикальном положении.

Произведена установка высокоточного барометрического датчика MS 5803 14BA и цифрового термометра DS18B20, что позволило дополнить к пробе грунта информацию о точном значении глубины и температуры с места забора, что особенно важно для последующего биологического анализа. У данного датчика есть исполнение DS18B20-IP67-0.5 с нержавеющей гильзой, небольшая дополнительная герметизация гарантирует работоспособность на таких глубинах и высокую скорость реакции на изменения температуры.

Вся модифицированная система работает под управлением двух микроконтроллеров AT Mega 328 (один в пульте, один в подводной части) и передача/прием информации происходит по интерфейсу RS 485 со скоростью 4800 бод по коаксиальному кабелю. Питается система от литиево-ионного аккумулятора 5000мА 2S. Аккумулятор в надводной части нужен при

разработке варианта с управлением оператором. Для работы всех элементов, включая сервопривод, достаточно 5В. Для этого необходим аккумулятор со стандартной защитной bms платой.

Рама, на которую крепится указанная выше электроника, это корпус дночерпателя. Корпус для аккумуляторов для работы на глубинах, блок с электроникой залит компаундом, (кроме мембраны батиметрического датчика) при этом возможность перепрошивки ESP сохраняется.

Эксплуатация модифицированного прибора за два полевых сезона подтвердила эффективность принятых технических решений. В частности, работу с прибором успешно провели сотрудники ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, а также студенты РГПУ им Герцена проходившие практику в экспедициях на Ладожском озере.

2. Описание интеллектуального дночерпателя с автоматизацией срабатывания ковшей и оцениванием качества пробы

Затем был разработан бюджетный вариант дночерпателя без видеокамеры, но с дополнительным сенсорным и вычислительным оборудованием, которое в автоматическом режиме принимает решение о захвате пробы и существенно экономит время работы специалистов за счет снижения вероятности подъема захлопнувшегося дночерпателя с недостаточным объемом донного грунта. Новая версия дночерпателя состоит из следующих основных модулей: дночерпатель автоматический коробчатый ДАК-250, система управления с датчиками и сервоприводом срабатывания ковшей, трос.

Существующие аналоги разработанного устройства являются механические дночерпатели, не имеющие средств автоматизации и интеллектуализации и рассчитаны исключительно на ручной отбор проб со дна водоема, качество которых полностью зависит от навыков специалиста.

Результаты предыдущих работ авторов были использованы при автоматизации дночерпателя, в частности комплексирование методов наземной и воздушной геоморфологической съемки с последующим обобщением результатов с данными космического зондирования при составлении карт-схем типов берегов Ладожского озера [10], а также разработка опытного образца подводного аппарата и серия его успешных испытаний при изучения подводных ландшафтов Ладожского озера [11, 12].

Разработанная версия дночерпателя отличается применением анализа качества забора пробы при автоматизации срабатывания ковшей. Себестоимость дночерпателя существенно не увеличивается за счет минимизации дорогостоящего оборудования для подводного визуального мониторинга и распределения функций между специалистом и автоматикой.

На рисунке 2 показана блок схема алгоритма применения и функционирования модернизированной версии интеллектуального дночерпателя. Слева показаны операции, выполняемые вручную, а справа - в автоматическом режиме, встроенным оборудованием. Основной этап – это спуск до дна. Пока текущее значение скорости, рассчитанное на основе показаний акселерометра в вертикальной плоскости, больше порогового

значения $V < V_{min}$, дночерпатель находится в свободном падении в водной среде. При достижении дна значение ускорения становится меньше минимального порогового значения и с этого момента производится также анализ других параметров. С этой целью используется микросхема ESP32, имеющая более перспективные параметры по быстродействию, наличие беспроводных интерфейсов, в том числе для перепрошивки, что позволяет обновлять систему, пересылать данные на смартфон. По измеренным значениям акселерометра производится оценка плотности грунта. Например, если дночерпатель упал на камни, то модуль значения ускорения будет существенно

выше, чем, если дночерпатель плавно зашел в грунт на дне водоема $|a| < a_{max}$. Затем проверяется под каким углом зашел дночерпатель в грунт. Если расчеты показывают, что дночерпатель достаточно глубоко зашел в грунт и при этом его отклонение от оси по вертикали D меньше D_{max} , то отдается команда на срабатывание сервопривода, захлопывающего ковши. Определяется температура и глубина с места взятия пробы. По характерному рывку троса в момент захлопывания ковшей специалист на борту судна понимает, что произведен успешный забор пробы и дночерпатель следует поднимать.

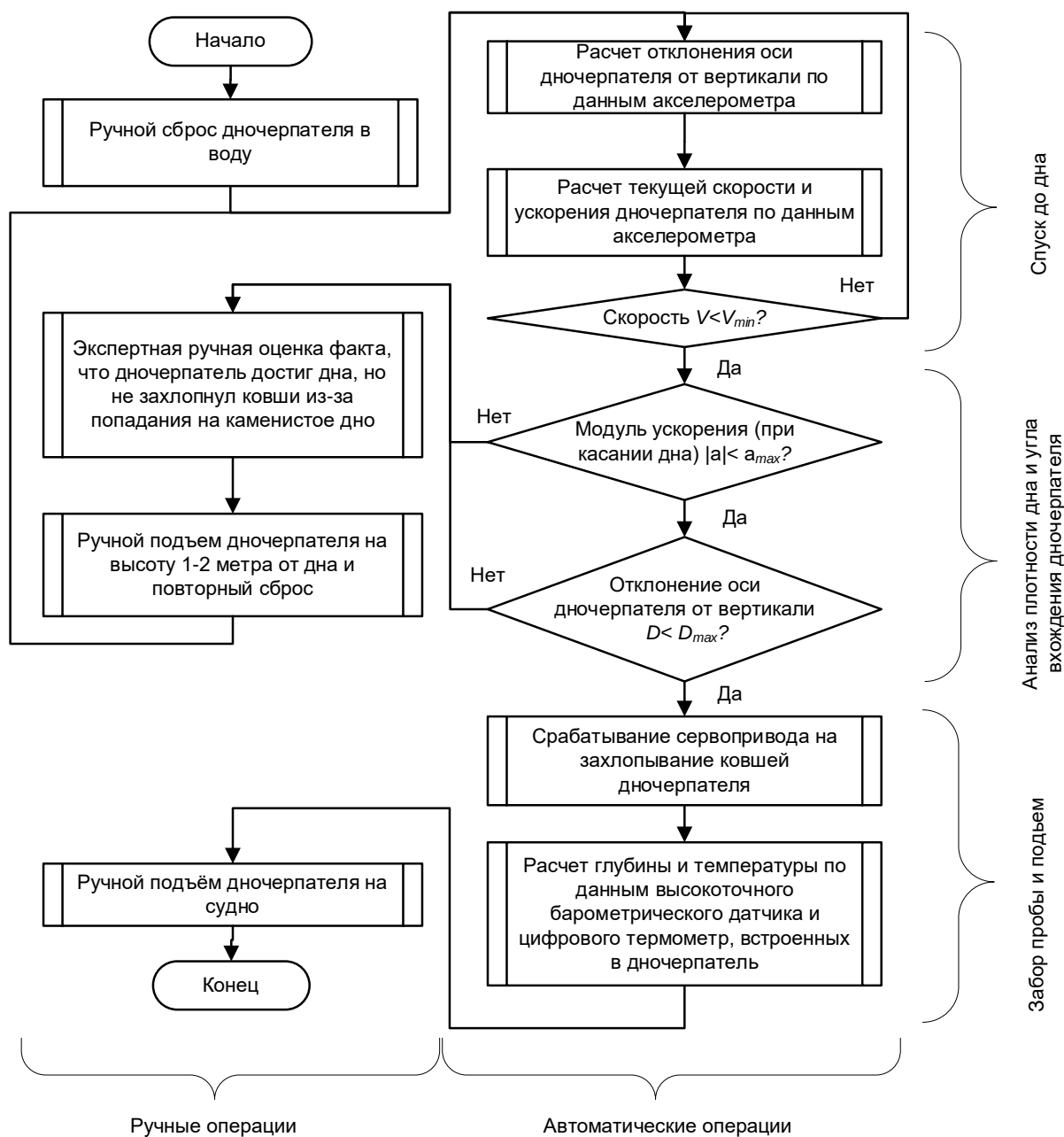


Рис. 2. Алгоритм применения и функционирования интеллектуального дночерпателя

В рассматриваемом варианте не предполагается другого канала информации кроме стального троса, способы с двусторонней линией передачи данных по специальному кабелю уже реализованы, но имеют недостатки в части цены и эргономики. Также перспективно исследовать теоретическую возможность кодирования и передачи информации путем вибрации по тросу. Если значения ускорения и отклонения дночерпателя от вертикали не позволили сработать автоматике, то специалист по ослабевшему натяжению троса понимает, что дночерпатель достиг дна, но проба не взята и его следует поднять на некоторую высоту (1-2 метра от дна) для выполнения повторной попытки. В таблице 1 приведен перечень характеристик, по которым можно оценить и сравнить эффективность использования и функционирования разработанного дночерпателя.

2. Экспериментальные результаты опытной эксплуатации интеллектуального дночерпателя

В период экспедиции по Ладожскому озеру в августе-сентябре 2022 года с помощью разработанного интеллектуального дночерпателя

был проведен сбор свыше 160 проб. На рисунке 3 приведены примеры донного грунта, взятые с акватории Ладожского озера в районах Сортавала, Путьсаари.

На рисунке 4 приведены графики показаний акселерометра, записанные на протяжении 0,5с с момента достижения дна. Данные с акселерометра поступают с частотой 200 Гц. На всех графиках отчетливо видно, что в момент соприкосновения со дном ускорение резко замедлялось и затем снова увеличивалось. При ударе о галечный грунт наблюдаются характерные скачки показаний акселерометра. Таким образом, по данным измерениям можно также судить о плотности и механических параметрах донного грунта, различия которых визуалью иногда не видны. Эксперименты показали, что для более точной настройки функционирования дночерпателя следует использовать и другие критерии нахождения оборудования на дне, в частности малые изменения глубины порядка 1-2 см за 2 с и отсутствие вращения вокруг оси прибора.

Таблица 1

Оценка эффективности работы интеллектуального дночерпателя

Характеристики	Глубины		
	10 м	100 м	250 м
Доля удачных срабатываний, %	99	90	90
Количество проб в час, ед.	20	15	8
Время непрерывной работы от 1 аккумулятора, ч.	4	4	4
Количество проб на 1 заряде, ед.	70	55	32



Рис. 3. Примеры донного грунта, отобранные разработанным дночерпателем

Заключение

Анализ публикаций по гидробиологическим исследованиям показал, что оборудование, используемое для сбора проб существенно не меняется в части механической конструкции благодаря надежности существующих решений. Однако очевидна актуальность интеллектуализации механических средств отбора донного грунта. Разработанные в данном исследовании два варианта модернизированных дночерпателей оснащены дополнительными сенсорными и вычислительными средствами, повышающими скорость и качество забираемого со дна материала.

Анализ показаний акселерометра в момент вхождения в грунт выявил направления дальнейших исследований и модернизации дночерпателя в части более тонкой настройки программно-алгоритмического обеспечения, а также оценки физико-механических свойств захватываемого донного грунта. Описанные дночерпатели и другие интеллектуальные технические средства, в том числе для борьбы с цианобактериальным цветением в пресноводных водоемах, производятся в рамках совместных работ Института озераведения Российской академии наук и Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук.

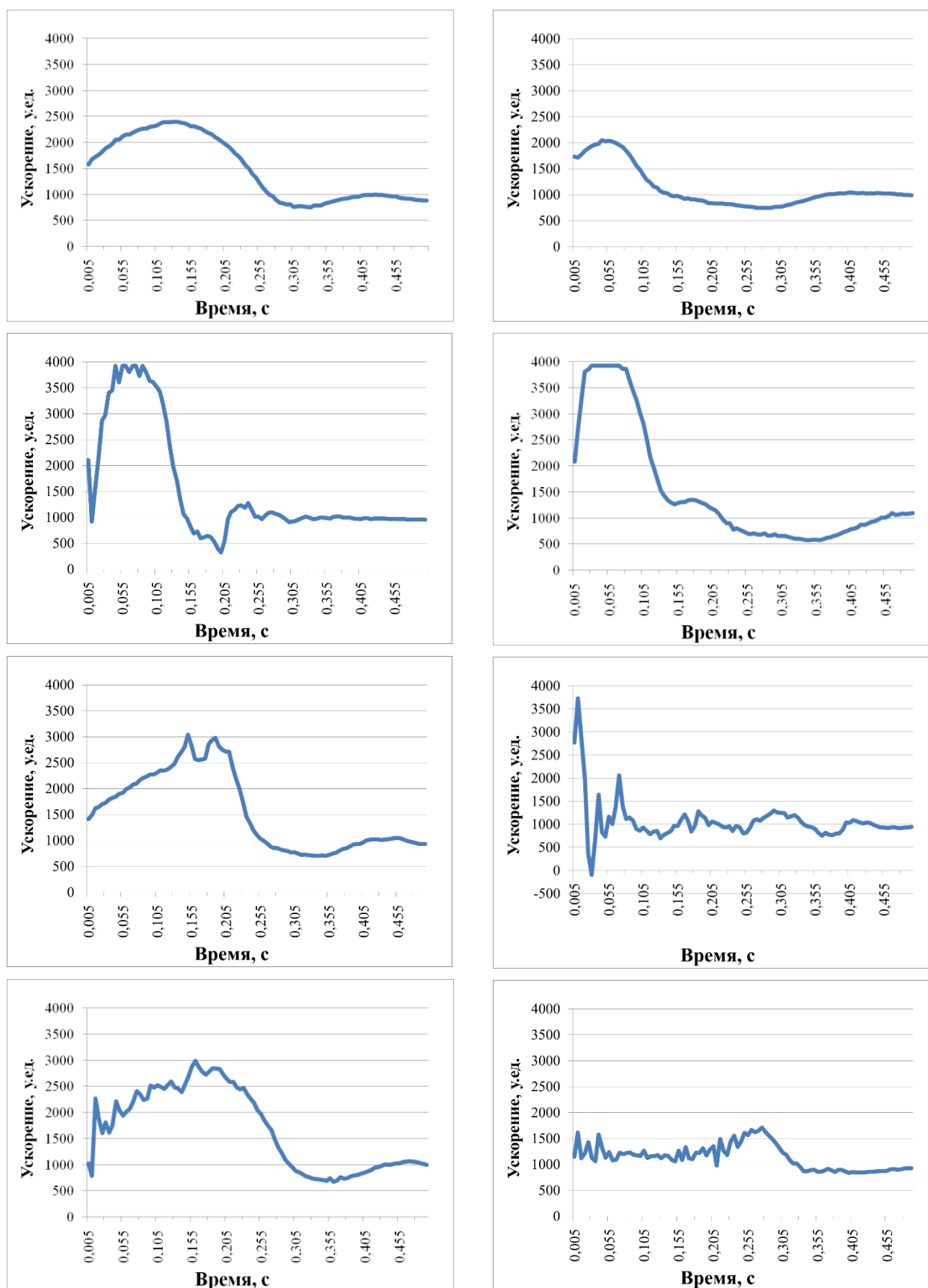


Рис. 4. Примеры графиков показаний акселерометра с момента достижения дна

Литература

1. Стёпочкин И.Е. Автоматический пробоотборник морской воды с заданной глубины // Подводные исследования и робототехника. 2022. №1(39). С. 80-84.
2. Баканов А.И. Сравнительная оценка эффективности работы дночерпателей различных систем // Гидробиологический журнал. 1977. Т. 13. № 2. С. 97-103.
3. Барулин Ю.А. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах: Зоопланктон и его продукция. – Л.: ГосНИОРХ, 1984. – 33 с.
4. Лях А.М. Минимальная структура базы для хранения данных о биологическом разнообразии ор-ганизмов // Труды СПИИРАН. 2020. № 4 (19). С. 855-879.
5. Кириченко Ю.В., Нго Ч.Т.К. Глубоководный автономный пробоотборник газодинамического типа для опробования рыхлых отложений и залежей плотного сложения // Горная промышленность. 2022. № 3. С. 106-111.
6. Алигаджиев М.М., Османов М.М., Амаева Ф.Ш. Об усовершенствовании методов гидробиологических исследований и стандартных орудий сбора проб // Юг России: экология, развитие. 2015. Т. 10. № 2. С. 54-61.
7. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Совершенствование прогнозирования разливов нефти от подводных источников // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 106-117.
8. Долинская Е.М., Бирицкая С.А., Теплых М.А., Ермолаева Я.К., Карнаухов Д.Ю., Зилов Е.А. Дистанционный подход в проведении гидробиологических исследований: от видеосъемки и эхолотирования до применения искусственного интеллекта и методов молекулярной биологии // Байкальский зоологический журнал. 2020. № 2 (28). С. 5-11.
9. Филиппова Н.А., Максимович Н.В., Герасимова А.В. К практике анализа неоднородности сообществ макробентоса мягких грунтов литорали (Кандалакшский залив, Белое море) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология. 2015. № 2. С. 61-77.
10. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата // Геоморфология. - 2019. - №1. - С. 25-37. doi: 10.31857/S0435-42812019125-37
11. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.И. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 4 (16). С. 51-55.
12. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Поздняков Ш.Р., Дудаков М.О., Юдин С.Н. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 433-445.

References

1. Stepochkin I.E. Automatic sampler of sea water from a given depth // Underwater research and robotics. 2022. No. 1(39). pp. 80-84.
2. Bakanov A.I. Comparative evaluation of the efficiency of bottom grabs of various systems // Hydrobiological journal. 1977. V. 13. No. 2. S. 97-103.
3. Barulin Yu.A. Guidelines for the collection and processing of materials for hydrobiological studies in freshwater reservoirs: Zooplankton and its products. - L.: GosNIORKh, 1984. - 33 p.
4. Lyakh A.M. The minimum structure of the database for storing data on the biological diversity of organisms // Proceedings of SPIIRAS. 2020. No. 4 (19). С. 855-879.
5. Kirichenko Yu.V., Ngo Ch.T.K. Deep-water autonomous sampler of gas-dynamic type for sampling of loose deposits and deposits of dense addition // Gornaya promyshlennost. 2022. No. 3. S. 106-111.
6. Aligadzhiev M.M., Osmanov M.M., Amaeva F.Sh. On the improvement of hydrobiological research methods and standard sampling tools // South of Russia: ecology, development. 2015. V. 10. No. 2. S. 54-61.
7. Naumov V.S., Plastinin A.E., Kalenkov A.N., Rodina N.S. Improving forecasting of oil spills from underwater sources // Marine intellectual technologies. 2021. No. 2-1 (52). pp. 106-117.
8. Dolinskaya E.M., Biritskaya S.A., Teplykh M.A., Ermolaeva Ya.K., Karnaukhov D.Yu., Zilov E.A. Remote approach in conducting hydrobiological research: from video filming and echo sounding to the use of artificial intelligence and molecular biology methods // Baikal Zoological Journal. 2020. No. 2 (28). pp. 5-11.
9. Filippova N.A., Maksimovich N.V., Gerasimova A.V. On the practice of analyzing the heterogeneity of macrobenthic communities in soft soils of the littoral (Kandalaksha Bay, White Sea) // Bulletin of St. Petersburg University. Series 3. Biology. 2015. No. 2. S. 61-77.
10. Anokhin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O. Geomorphology and typification of the shores of Lake Ladoga according to survey data from an unmanned aerial vehicle // Geomorphology. - 2019. - No. 1. - С. 25-37. doi:10.31857/S0435-42812019125-37
11. Dudakova D.S., Dudakov M.O., Anokhin V.I. Experience in using a deep-sea remote-controlled vehicle to study the underwater landscapes of Lake Ladoga // Russian Journal of Applied Ecology. 2018. No. 4 (16). pp. 51-55.
12. Dudakova D.S., Anokhin V.M., Pozdnyakov Sh.R., Dudakov M.O., Yudin S.N. Underwater landscapes of the islands of Mantsinsaari and Lunkulansaari in the zone of Riphean uplifts in the eastern part of Lake Ladoga // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Geographic series. 2021. V. 85. No. 3. S. 433-445.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Олегович Дудаков, ведущий инженер лаборатории комплексных проблем лимнологии Института озераведения Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: mike814@yandex.ru

Mikhail O. Dudakov, Leading Engineer of the Laboratory of Complex Problems of Limnology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 199178, St. Petersburg, 14 line V.O., 39, e-mail: mike814@yandex.ru

Дина Сергеевна Дудакова, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории гидробиологии Института озераведения Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: judina-d@yandex.ru

Dina S. Dudakova, Ph.D. (Biol.), Researcher of Laboratory of Hydrobiology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 199178, St. Petersburg, 14 line V.O., 39, e-mail: judina-d@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 796.015.62

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.069>

Разработка индекса оптимальной физической активности для морских специалистов

А.А. Ковалёв¹ sheynin@mail.ru, А.А. Зайцев^{1,2} aaz39@rambler.ru, В.И. Гнатюк² gnatukvi@mail.ru,
О.Р. Кивчун¹ oleg_kivchun@mail.ru

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, ²Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Для создания предпосылок здорового образа жизни и профилактики различных заболеваний активности морских специалистов в рейсе, все более становится актуальным вопрос персонификации их двигательной активности. В статье описывается процесс разработки индекса оптимальной физической активности, который отличается: персонификацией, динамичностью изменения во времени, нормировкой (от 0 до 100) и имеет четыре зоны для оценки физической активности человека. Разработка индекса оптимальной физической активности является развитием методики управления двигательной активности. Индекс вычисляется на основе частоты сердечных сокращений (пульса). Применение интеллектуальных технологий позволят собирать и обрабатывать информацию о частоте сердечных сокращений, и тем самым управлять двигательной активностью морских специалистов в рейсе. Предложенный индекс может быть использован с целью определения оптимального режима двигательной активности и составления индивидуальных тренировочных программ морских специалистов в рейсе. Применение индекса на практике позволит сделать физическую нагрузку экипажей судов оптимальной, что потенциально снизит негативные эффекты, обусловленные спецификой профессиональной деятельности морских специалистов.

Ключевые слова: двигательная активность; физическая нагрузка; дозирование физической нагрузки; персонификация двигательной активности; цифровые данные; пульс.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения государственного задания № FZWM-2020-0013.

Для цитирования: Ковалёв А.А., Зайцев А.А., Гнатюк В.И., Кивчун О.Р. Разработка индекса оптимальной физической активности для морских специалистов. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 100—104.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.069>

Development of the optimal index physical activity for marine specialists

Alexander A. Kovalev¹ sheynin@mail.ru, Anatoliy A. Zaitsev^{1,2} aaz39@rambler.ru,
Viktor I. Gnatyuk² gnatukvi@mail.ru, Oleg R. Kivchun¹ oleg_kivchun@mail.ru

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation, ²Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In order to create prerequisites for a healthy lifestyle and the prevention of various diseases of the activity of marine specialists on the voyage, the issue of personification of their engine becomes more and more urgent. The article is devoted to the process of developing an index of optimal physical activity, which is distinguished by: personification, dynamism of change over time, normalization (from 0 to 100) and we have four zones for assessing human physical activity. The development of an index of optimal physical activity is the development of a technique for controlling motor activity. The index is calculated based on the heart rate (pulse). The use of intelligent technologies will make it possible to collect and process information about the heart rate, and thereby control the motor activity of marine specialists during the voyage. The proposed index can be used to determine the optimal mode of motor activity and to develop individual training programs for marine specialists during the voyage. The application of the index in practice will make it possible to make the physical load of ship crews optimal, which will potentially reduce the negative effects caused by the specifics of the professional activities of marine specialists.

Keywords: motor activity; physical activity; dosing of physical activity; personification of motor activity; digital data; pulse.

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education in the framework of the implementation of the state assignment No. FZWM-2020-0013.

For citation: Alexander A. Kovalev, Anatoliy A. Zaitsev, Viktor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun Development of the optimal index physical activity for marine specialists. Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 100—104.

Введение

В Стратегии Минздрава России до 2025 года [1] планируется достичь следующих метрик: увеличения до 55,5 % регулярно занимающихся физической культурой и ведущих активный образ жизни; снижение динамики прироста заболеваемости ожирением до 5% и смертности среди взрослого населения до 340 случаев на 100 тыс. [1]. В связи, с этим становится актуальной персонализация при дозировании интенсивности физической активности морских специалистов в рейсе. Министерством здравоохранения РФ предложены рекомендации по занятию спортом [2], но они носят больше общий и информативный характер – в них не рассмотрен вопрос персонализации интенсивности нагрузки и у конкретно взятого человека отсутствует научнообоснованный показатель, который отличается персонализацией и динамичностью. Под динамичностью понимается – свойство показателя изменяться во времени.

Для создания необходимого оздоровительного эффекта необходимо соблюдать баланса между интенсивности физической нагрузки и возможностям человеческого организма [7-12]. Параметром реакции организма на интенсивность нагрузки является значение частоты сердечных сокращений (ЧСС или частота пульса в уд/мин). В настоящей статье впервые представляется разрабатываемый индекс для нормирования физической нагрузки, основанный на ЧСС.

1. Развитие методики управления двигательной активностью методики

Из отечественных подходов нормирования физической активности по ЧСС можно выделить классический [7-12] и ценологический (рис. 1). Анализ зарубежного опыта персонализации интенсивности физической активности показал, что Норвежским университетом науки и технологий разработан индекс физической активности PAI (Personal Activity Intelligence), который показывает, достаточно ли человек двигается, чтобы оставаться здоровым и продлить активное долголетие [3]. PAI вычисляется на основе ЧСС и отображается в виде общего показателя за 7 дней. Алгоритм расчета не раскрывается, но принцип его работы прост: чем чаще бьется сердце, тем больше очков PAI можно заработать. Данный показатель внедрен в фитнес-трекеры, браслеты и смарт-часы, которые имеют функцию постоянного отслеживания пульса [3]. В рамках разрабатываемого индекса, основанного на методике управления активностью [4-6], для информативности предлагается дополнить нормировкой от 0 до 100 баллов. Это позволит морских специалистам, работающих в рейсе понимать их уровень еженедельной физической активности.



Рис. 1. Подходы в области дозирования физической нагрузки

Автором разработана методика управления двигательной активностью [4-6], основанная на законе энергетического баланса [4]. Управление двигательной активностью с учетом ЧСС организуется по методике, которая включает четыре шага (рис. 2). Новые пункты методики выделены отдельным цветом на рисунке.

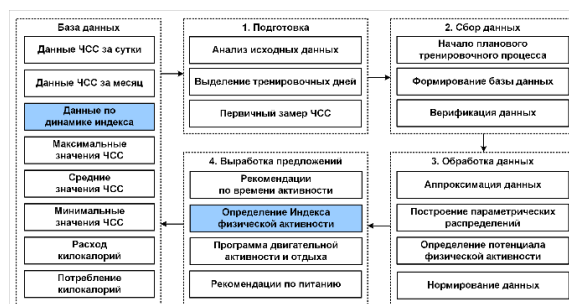


Рис. 2. Шаги методики по расчету индекса

На первом шаге проводится анализ данных и первичный замер ЧСС [4-6]. На втором шаге формируется база данных (рис. 3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1		01.03.2018	02.03.2018	03.03.2018	04.03.2018	05.03.2018	06.03.2018	07.03.2018	08.03.2018	09.03.2018	10.03.2018	11.03.2018	12.03.2018	13.03.2018
2	0:00	53	50	51	48	48	50	50	56	56	52	55	48	
3	0:01	52	50	53	49	50	52	65	56			50	48	
4	0:02			53	50	49	50	63	63			48	49	
5	0:03			52	49	49	51	50	57	58	52	53	51	
6	0:04			53	50	54	51	49	57	55	52	49	52	
7	0:05	53	49	49	49	46	51	50	56	54	51	49	53	
8	0:06	50	49	50	50	46	51	50	56	58	52	50	52	
9	0:07	50	50	50	50	48	51	54	57	55	50	49	53	
10	0:08	52	50	51	49	48	50	47	70	56	51	50	54	
11	0:09	51	50	49	50	49	51	48	58	58	51	51	47	
12	0:10	60	51	50	49	51	51	48	54	60	50	50	48	
13	0:11	55	58	50	49	55	55	49	53	62	51	50	49	
14	0:12	49	50	50	50	55	48	49	53	59	51	50	50	
15	0:13	52	49	49	50	49	49	50	54	60	65	50	51	
16	0:14	50	54	51	49	58	49	51	54	60				
17	0:15	50				49	49	52	55	60				
18	0:16	51				48	49	53	56	61				
19	0:17	56	52	50	50	47	48	52	55	64	59	48	51	

Рис. 3. База данных ЧСС

На третьем шаге осуществляется обработка данных путем аппроксимации значений и построения распределений границ (рис. 4) [4-6].

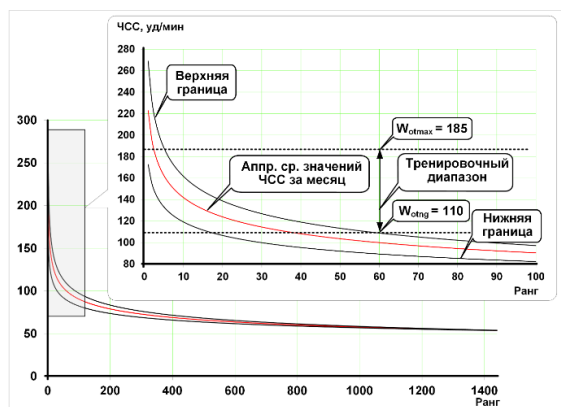


Рис. 4. Верхняя и нижняя границы тренировочной нагрузки

На четвертом шаге методики формируются (таблица 1) временные рекомендации для зон ЧСС во время занятий физической активностью [4-6].

Таблица 1

Время нахождения в зонах ЧСС

Наименование зоны ЧСС	ЧСС, уд/мин	Уровень подготовленности		
		Начинающий	Средний	Продвинутый
Анаэробная	168 – 185	1 мин	4 мин	8 мин
Пороговая	149 – 167	1 мин	4 мин	7 мин
Аэробная	131 – 148	4 мин	7 мин	12 мин
Средняя	110 – 130	9 мин	22 мин	31 мин
Общее время	–	15 мин	37 мин	58 мин
Интенсивность	–	Оздоровительная	Средняя	Большая

2. Разработка индекса оптимальной физической активности

Индекс оптимальной физической активности (Index of optimal physical activity) – индекс, который отображает общую физическую активность за неделю в диапазоне от 0 до 100 (рис. 5). Данный индекс разработан на базе методики оптимального управления двигательной активности и является ее дальнейшим развитием (рис. 1). Расчет индекса осуществляется на 4 этапе методики.

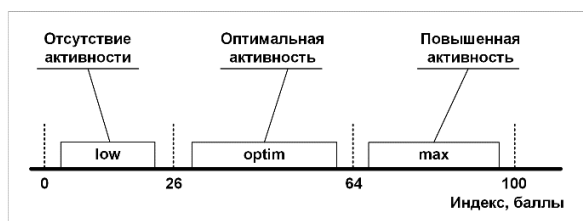


Рис. 5. Индекс оптимальной физической активности

Индекс формируется на основе границ тренировочной нагрузки (рис. 4). Данные нижней границы – показывают минимальное и необходимое количество минут для оздоровительных занятий на частоте свыше 110 уд/мин за один день. Нагрузка на нижней границе носит больше оздоровительный характер (табл. 1) с общим временем тренировки 15 мин., а нагрузка на верхней границе уже для продвинутого уровня – 58 мин. Значения нижней и верхней границ получены на основе аппроксимаций значений ЧСС за предыдущий месяц и носят рекомендательный характер по физической нагрузке на день (рис. 4).

Для получения минимального и максимального недельного временного значения 15 мин. и 58 мин. умножаются на 7, получается, что минимальной временной нормой для поддержания еженедельной физической активности для конкретного человека является 105 мин., а максимальной – 406 мин. Индекс формируется благодаря этим значениям, где за 100 баллов принимается еженедельные занятия общей продолжительностью 406 мин. с соответствующей дифференциацией по зонам (табл. 1). Таким образом, индекс нормирован до 100 баллов, где выделяется 3 зоны (рис. 5):

- до 25 баллов – низкая физическая активность;
- от 26 до 64 баллов – оптимальная (рекомендуемая);
- от 65 до 100 баллов – максимальная (повышенная).

Для достижения оздоровительного эффекта (25 баллов) нет необходимости тренироваться 7 раз в неделю по 15 мин. Для достижения минимальной нормы (25 баллов, от 105 мин. в неделю) есть несколько вариантов:

- средняя активность по 37 мин, 3 раза в неделю и более;
- активность продвинутого уровня по 58 мин, 2 раза в неделю и более;
- любые другие комбинации с суммарной еженедельной активностью более 105 мин.

При расчете индекса учтены следующие нюансы:

1. Все время физической нагрузки свыше 58 мин. за один день не учитывается. Это стимулирует заниматься минимум два раза в неделю.

2. Для достижения 100 баллов необходимо «заполнить» все зоны ЧСС (табл. 1). Это стимулирует дифференцированно распределить интенсивность нагрузки во время тренировок.

3. Для предотвращения «выхода» за норму в определенной зоне ЧСС, например, в анаэробной – все время свыше 8 минут – не учитывается (табл. 1).

4. После обновления базы данных ЧСС через определенный период (неделя, месяц, год) индекс изменяться. Для набора 100 баллов может потребоваться больше или меньше усилий в зависимости от прошедшего периода.

На данном этапе ведется работа по изучению свойств индекса оптимальной физической активности и возможностей его внедрения в носимые устройства отечественных и зарубежных производителей. Сейчас занятия физической активностью проводятся с ориентиром на таблицу 1. Текущее значение ЧСС и время нахождения в зонах ЧСС отображается на экранах часов в режиме реального времени (рис. 6), что позволяет контролировать рекомендуемые нормы физической активности.

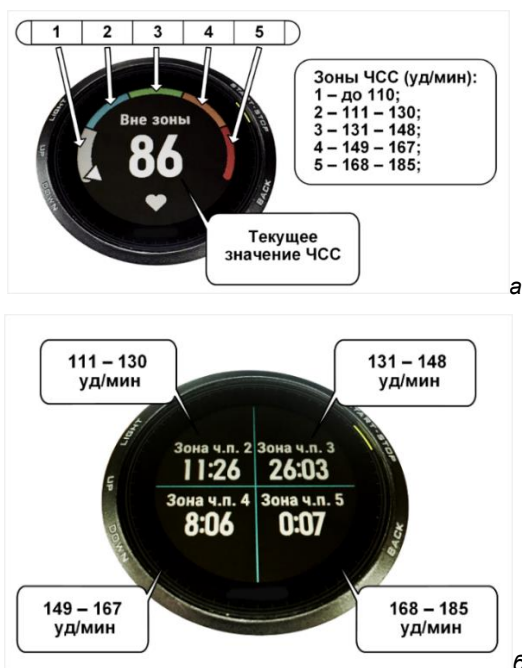


Рис. 6. Скриншоты экрана смарт-часов:
а – с ЧСС в текущий момент времени;
б – со временем нахождения в каждой зоне ЧСС.

Заключение

Таким образом, впервые для объективной оценки еженедельной физической нагрузки морских специалистов в рейсе предложен индекс оптимальной физической активности, который является научнообоснованным показателем, отличающийся персонификацией, динамичностью и нормировкой от 0 до 100 баллов. Индекс разработан на базе методики оптимального управления двигательной активности и является ее дальнейшим развитием [4-6]. На данном этапе исследований индекс оптимальной физической активности продолжает совершенствоваться.

Литература

1. Приказ Минздрава России от 15.01.2020 № 8 «Стратегия формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года».
2. Минздрав России // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://minzdrav.gov.ru/news/2020/02/18/13372-spetsialistami-minzdrava-rossii-razrabotany-rekomendatsii-po-zanyatiyu-sportom-dlya-naseleniya> (дата обращения 22.06.2022).
3. Sophie K. Kieffer, Javaid Nauman, Kari Syverud, Hege Selboskar, Stian Lydersen, Ulf Ekelund, Ulrik Wisløff. Association between Personal Activity Intelligence (PAI) and body weight in a population free from cardiovascular disease – The HUNT study The Lancet Regional Health – Europe Volume 5, June 2021, 100091.
4. Шейнин А.А. Закон энергетического баланса человеческого организма: Трактат о здоровье. - Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2020. - Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/troz.pdf>, свободный.
5. Шейнин А.А. Управление двигательной активностью морских специалистов в рейсе с использованием интеллектуальных технологий / В.И. Гнатюк, А.А. Зайцев, А.А. Шейнин // МИТ. - М.: Научно-исследовательский центр "МОРИНТЕХ". - 2019. - № 4 (46), т. 4. - С. 88 - 93. - Web of Science.
6. Шейнин А.А. Управление двигательной активностью человека с использованием рангового анализа / А.А. Зайцев, А.А. Шейнин // БМФ 2019. Материалы 7 форума. В 6-ти томах. - Калининград: БГА РФ ФГБОУ ВО «КГТУ». - 2019.
7. Амосов Н.М. Физическая активность и сердце / Н.М. Амосов, Я.А. Бендет. - Киев: Здоровье, 1984. - 228 с.
8. Апанасенко Г.Л. Физическое здоровье и максимальная аэробная способность индивида / Г.Л. Апанасенко // Теория и практика физической культуры. - 1988. - № 6. - С. 29 - 30.
9. Волков В.М. Человек и бег / В. М. Волков, Е. Г. Мильнер. - М.: Физкультура и спорт. - 1987. - 266 с.
10. Зайцев А.А. Физическая культура взрослого человека. / А.А. Зайцев. - Калининград: Министерство здравоохранения Калининградской области, 2007. - 36 с.
11. Селуянов В.Н. Технология оздоровительной физической культуры. - М.: ТВТ Дивизион, 2009. - 192с.
12. Селуянов В.Н., Мякинченко Е.Б. Оздоровительная тренировка по системе Изотон. - М.: СпортАкадемПресс, 2001. - 67 с.

References

1. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 8 dated 15.01.2020 "Strategy for the formation of a healthy lifestyle of the population, prevention and control of non-communicable diseases for the period up to 2025".
2. Ministry of Health of Russia // Electron. dan. URL access mode: <https://minzdrav.gov.ru/news/2020/02/18/13372-spetsialistami-minzdrava-rossii-razrabotany-rekomendatsii-po-zanyatiyu-sportom-dlya-naseleniya> (accessed 22.06.2022).
3. Sophie K. Kieffer, Javaid Nauman, Kari Syverud, Hege Selboskar, Stian Lydersen, Ulf Ekelund, Ulrik Wisløff. Association between Personal Activity Intelligence (PAI) and body weight in a population free from cardiovascular disease – The HUNT study The Lancet Regional Health – Europe Volume 5, June 2021, 100091.
4. Sheinin, A.A. The Law of the energy balance of the human body: A Treatise on Health. - Kaliningrad: KIC «Technocenosis», 2020. - Access mode: <http://gnatukvi.ru/troz.pdf>, free.

5. Sheinin, A.A. Management of motor activity of marine specialists on a voyage with the use of intelligent technologies / V.I. Gnatyuk, A.A. Zaitsev, A.A. Sheinin // MIT. - M.: Scientific Research Center «MORINTECH». - 2019. - № 4 (46), vol. 4. - pp. 88-93. - Web of Science.
6. Sheinin, A.A. Management of human motor activity using rank analysis / A.A. Zaitsev, A.A. Sheinin // BMF 2019. Materials of the VII Forum. In 6 volumes. - Kaliningrad: BGA RF FGBOU VO «KSTU». - 2019. - p. 597 - 608.
7. Amosov, N.M. Physical activity and heart / N.M. Amosov, Ya.A. Bendet. - Kyiv: Health, 1984. - 228 p.
8. Apanasenko G.L. Physical health and maximum aerobic capacity of an individual / G.L. Apanasenko // Theory and practice of physical culture. - 1988. - No. 6. - S. 29 - 30.
9. Volkov V.M. Man and running / V. M. Volkov, E. G. Milner. - M.: Physical culture and sport. - 1987. - 266 p.
10. Zaitsev A.A. Physical culture of an adult. / A.A. Zaitsev. - Kaliningrad: Ministry of Health of the Kaliningrad region, 2007. - 36 p.
11. Seluyanov V.N. Technology of health-improving physical culture. - M.: TVT Division, 2009. - 192p.
12. Seluyanov V. N., Myakinchenko E. B. Health training according to the Isoton system. - M.: SportAkademPress, 2001. - 67 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Анатольевич Ковалёв, кандидат технических наук, научный сотрудник Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: sheynin@mail.ru

Alexander A. Kovalev, Cand. Sc. (Eng.), Researcher Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, e-mail: sheynin@mail.ru

Анатолий Александрович Зайцев, доктор педагогических наук, профессор, профессор Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, заведующий кафедрой физической культуры Калининградского государственного технического университета, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: aaz39@rambler.ru

Anatoliy A. Zaitsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, Head of the Department of Physical Culture of the Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky prospekt, 1, e-mail: aaz39@rambler.ru

Виктор Иванович Гнатюк, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики Калининградского государственного технического университета, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: gnatukvi@mail.ru

Viktor I. Gnatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electricity of the Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky prospekt, 1, e-mail: gnatukvi@mail.ru

Олег Романович Кивчун, кандидат технических наук, доцент Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Oleg R. Kivchun, Cand. Sc. (Eng.), Docent Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, e-mail: oleg_kivchun@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 22.11.2022.

Научная статья

УДК 658.262; 658.512:005

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.070>**Методика прогнозирования электропотребления объектов на основе значений ранговых фазовых углов**В.И. Гнатюк¹ gnatukvi@mail.ru, О.Р. Кивчун² oleg_kivchun@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет,²Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

Аннотация. В статье рассмотрена методика прогнозирования электропотребления объектов на основе значений ранговых фазовых углов. Основой для разработки данной методики стали положения векторного рангового анализа, которые позволили разработать математический аппарат прогнозирования, позволяющий существенно дополнить метод управления электропотреблением объектов на основе синтеза процедур рангового анализа за счёт увеличения точности процедуры прогнозирования. Алгоритм прогнозирования включает в себя следующие этапы: подготовка исходных данных, построение векторных ранговых распределений, определение радиус-векторов, ранговых норм и ранговых фазовых углов, вычисление и прогнозирование синусов ранговых фазовых углов, прогнозирование на основе исходных данных, вычисление ошибок прогноза и сравнение полученных результатов. Представленную методику целесообразно рекомендовать для применения при среднесрочном и долгосрочном планировании на объектах приморских территорий с целью повышения их энергоэффективности. Кроме того, разработанный математический аппарат может стать основой для создания цифровых сервисов прогнозирования ресурсов различных видов.

Ключевые слова: прогнозирование, электропотребление, припортовый электротехнический комплекс, ранговый фазовый угол, векторный ранговый анализ, векторное ранговое распределение, энергоэффективность, ошибка прогноза.

Для цитирования: Гнатюк В.И., Кивчун О.Р. Методика прогнозирования электропотребления объектов на основе значений ранговых фазовых углов. Морские интеллектуальные технологии 2022. № 4 часть 3, С.105—109.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.070>**Method of forecasting power consumption of objects based on the values of the rank phase angles**Victor I. Gnatyuk¹, gnatukvi@mail.ru, Oleg R. Kivchun², oleg_kivchun@mail.ru,¹Kaliningrad state technical University, ²I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

Аннотация. The article considers the method of forecasting the power consumption of objects based on the values of rank phase angles. The basis for the development of this technique were the provisions of vector rank analysis, which allowed us to develop a mathematical forecasting apparatus that allows us to significantly supplement the method of managing the power consumption of objects based on the synthesis of rank analysis procedures by increasing the accuracy of forecasting procedures. The prediction algorithm includes the following steps: preparation of initial data, construction of vector rank distributions, determination of radius vectors, rank norms and rank phase angles, calculation and prediction of the sine of rank angles, prediction based on the initial data, calculation of prediction errors and comparison of the results obtained. It is advisable to recommend the presented methodology for use in medium- and long-term planning at the facilities of coastal territories in order to increase their energy efficiency. In addition, the developed mathematical apparatus can become the basis for the creation of digital services for forecasting various types of resources.

Keywords: forecasting, power consumption, portside electrical complex, rank phase angle, vector rank analysis, vector rank distribution, energy efficiency, forecast error.

For citation: Victor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun The method of forecasting the power consumption of objects based on the values of the rank phase angles, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P.105—109.

Введение

Вопросы прогнозирования всегда играли важнейшую роль в управлении энергоресурсами объектов технических систем приморских территорий. Сегодня, наряду с высокими темпами развития информационных технологий, разрабатываются новые методы прогнозирования и планирования ресурсов различного типа. Их внедрение осуществляется на различных уровнях припортовых электротехнических комплексов (ПЭК). На сегодняшний день достаточно много существует

научных школ, исследования которых посвящены вопросам прогнозирования ресурсов сложных технических систем, корпораций и организаций различных сфер [1-3]. Среди зарубежных учёных можно выделить следующих: K. Nassirtoussi, L. Zhao, N. Ramakrishnan, G. Finnie, L. Anastasakis, C.-J. Huang, M. Liebmann и др.

Ведущими отечественными учёными в области прогнозирования ресурсов различного типа являются Н.Э. Голяндина, А.Ю. Шлемов, С.М. Ермаков, Б.И. Макоклюев, А.С. Поилжаров, А.А. Басов, Ю.Э. Алла, С.В. Локтионов и др.

Чаще всего методы прогнозирования являются составной частью следующих систем: Enterprise Resource Planning (ERP), System Analysis and Program Development «SAP» или Manufacturing execution system (MES). Анализ их эксплуатации показал, что методы прогнозирования, которые используются при среднесрочном и долгосрочном планировании ресурсов, нуждаются в серьёзных доработках. Основной причиной этому послужило быстрое развитие цифровых технологий, которые уже внедрены на объектах ПЭК. Например, применение цифровых приборов учёта позволило с высокой достоверностью в режиме реального времени накапливать большие массивы данных об энергоресурсах. Их обработка может позволить учесть в процессе планирования свойства объектов ПЭК: индивидуальные и системные. Однако современные методы классической статистики не позволяют обрабатывать большие массивы с необходимой точностью. Методы интеллектуальной обработки данных на основе нейронных сетей способны выполнить данную операцию только на краткосрочных интервалах [3].

Уже на протяжении нескольких десятилетий особой популярностью для работы с большими массивами данных применяются техноценнологические методы. Их апробация в области управления и прогнозирования электропотребления крупных инфраструктур показала наиболее лучшие результаты по сравнению с классическими методами. Большой вклад в данной области внесли Б.И. Кудрин, В.И. Гнатюк, Б.В. Жилин, В.В. Фуфаев, Д.В. Луценко и др. Отличительной особенностью техноценнологических методов прогнозирования является возможность применения методологии рангового, векторного и комбинаторного анализов, которые позволяют учесть системные и индивидуальные свойства объектов, обрабатывая большие объёмы данных.

Таким образом, учитывая основные положения и методы техноценнологического подхода, с целью повышения точности прогнозирования электропотребления объектов ПЭК разработана методика прогнозирования электропотребления на основе ранговых фазовых углов.

1. Структура методики прогнозирования электропотребления объектов на основе ранговых фазовых углов

В [1] представлена подробно теория векторного рангового анализа, которая включает в себя ряд методов управления электропотреблением электротехнических комплексов, значительно повышающих их энергоэффективность. Одним из них является метод управления электропотреблением на основе синтеза процедур рангового анализа (рис. 1).



Рис. 1. Этапы метода управления электропотреблением на основе синтеза процедур рангового анализа

Основной целью данного метода является снижение электропотребления объектов на основе комплексного применения процедур рангового анализа: интервального, оценочного, прогнозирования и нормирования. Причём, благодаря комплексным алгоритмам и новому аппарату синтеза процедур рангового анализа, снижение электропотребления осуществляется индивидуально для каждого объекта. Подробно метод описан в [4].

Одной из ключевых процедур метода является прогнозирование электропотребления. Высокая точность прогноза позволит существенно повысить качество получаемых норм снижения электропотребления по результатам реализации метода. С этой целью на основе векторного рангового анализ разработана методика прогнозирования электропотребления объектов на основе ранговых фазовых углов (рис. 2).

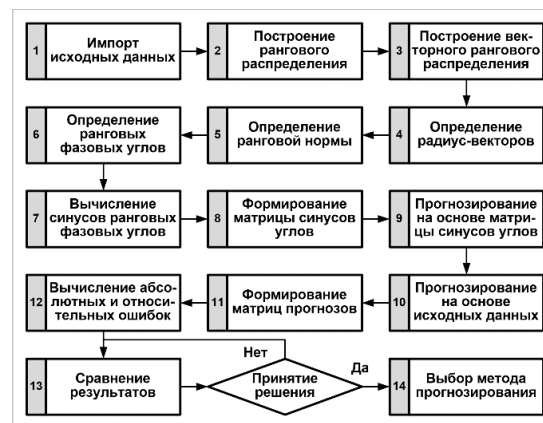


Рис. 2. Методика прогнозирования электропотребления объектов на основе ранговых фазовых углов

На первоначальном этапе методики осуществляется импорт множеств «сырых», верифицированных и аппроксимационных данных по электропотреблению и для каждого из них формируется проверочный вектор. Обычно проверочный вектор представляет собой «сырые» данные по электропотреблению за последний известный год или месяц (рис. 3).

Ранг	Электропотребление объектов, кВт·ч в месяц										
	...	t-8	t-7	t-6	t-5	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1
1	...	W ₁₈	W ₁₇	W ₁₆	W ₁₅	W ₁₄	W ₁₃	W ₁₂	W ₁₁	W ₁₀	?
2	...	W ₂₈	W ₂₇	W ₂₆	Проверочный вектор			W ₂₂	W ₂₁	W ₂₀	?
3	...	W ₃₈	W ₃₇	W ₃₆	W ₃₅	W ₃₄	W ₃₃	W ₃₂	W ₃₁	W ₃₀	?
4	...	W ₄₈	W ₄₇	W ₄₆	W ₄₅	Вектор прогнозирования			W ₄₂	W ₄₁	?
5	...	W ₅₈	W ₅₇	W ₅₆	W ₅₅	W ₅₄	W ₅₃	W ₅₂	W ₅₁	W ₅₀	?
6	...	W ₆₈	W ₆₇	Матрица данных			W ₆₃	W ₆₂	W ₆₁	W ₆₀	?
7	...	W ₇₈	W ₇₇	W ₇₆	W ₇₅	W ₇₄	W ₇₃	W ₇₂	W ₇₁	W ₇₀	?
.....	...										
n-1	...	W _{(n-1)8}	W _{(n-1)7}	W _{(n-1)6}	W _{(n-1)5}	W _{(n-1)4}	W _{(n-1)3}	W _{(n-1)2}	W _{(n-1)1}	W _{(n-1)0}	?
n	...	W _{n8}	W _{n7}	W _{n6}	W _{n5}	W _{n4}	W _{n3}	W _{n2}	W _{n1}	W _{n0}	?

Рис. 3. Формирование исходных данных

Алгебраическая запись полученных множеств представляется следующей системой:

$$\begin{cases} \{W_k^{RAW}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_k^{VER}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{VER}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{RAN}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{RAN}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Approx}} \{W_k^{APP}\}_{k=1}^n, \end{cases} \quad (1)$$

где $\{W_k^{RAW}\}_{k=1}^n$ – множество «сырых» значений электропотребления;

$\{W_k^{VER}\}_{k=1}^n$ – множество верифицированных значений;

$\{W_k^{RAN}\}_{k=1}^n$ – множество отранжированных значений;

$\{W_k^{APP}\}_{k=1}^n$ – множество аппроксимированных значений.

На основе множеств системы (1) в векторном ранговом пространстве строится векторное ранговое распределение (BPP). Чаще всего по множеству аппроксимационных данных.

К каждому единичному вектору BPP проводится радиус-вектор r_j и вычисляется его норма $|r_j|$. Также для всех радиус-векторов определяются численные значения ранговых фазовых углов (рис. 4).

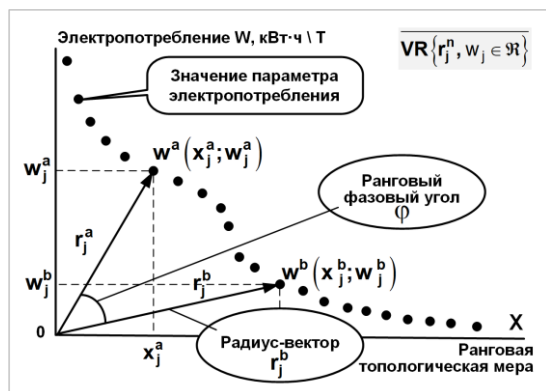


Рис. 4. Определение параметров векторного рангового распределения

Ранговый фазовый угол представляет собой угол между двумя радиус-векторами в векторном ранговом пространстве, отложенными от одной точки, и отражает значение, на которое необходимо повернуть один из

радиус-векторов вокруг своего начала до положения сонаправленности с другим радиус-вектором [1].

Далее формируются матрицы синусов ранговых фазовых углов и ранговых норм, которые являются исходными данными для прогнозирования. Алгоритм прогнозирования в данном случае состоит из следующих шагов:

- импорт матриц синусов ранговых фазовых углов и ранговых норм;
- аппроксимация BPP ранговых фазовых углов и ранговых норм с построением временных рядов первой точки и рангового коэффициента;
- аппроксимация временных рядов первой точки и рангового коэффициента;
- осуществление прогноза [6].

После импорта матриц синусов ранговых фазовых углов и ранговых норм их значения сортируются в убывающей последовательности. В результате формируется следующая система:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_{1,1} & K & \varphi_{1,m-1} & \varphi_{1,m} \\ M & O & M & M \\ \varphi_{n-1,1} & K & \varphi_{n-1,m-1} & \varphi_{n-1,m} \\ \varphi_{n,1} & K & \varphi_{n,m-1} & \varphi_{n,m} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$|R| = \begin{pmatrix} r_{1,1} & K & r_{1,m-1} & r_{1,m} \\ M & O & M & M \\ r_{n-1,1} & K & r_{n-1,m-1} & r_{n-1,m} \\ r_{n,1} & K & r_{n,m-1} & r_{n,m} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где φ – значение ранговых фазовых углов;

r – значение ранговых норм;

m – количество лет предыстории;

n – количество объектов.

Аппроксимация временных рядов W_1 и β , как правило, осуществляется по следующему выражению:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = a_1 + b_1 \cdot t; \\ \beta_1(t) = a_2 + b_2 \cdot t, \end{cases} \quad \begin{cases} r_1(t) = a_1 + b_1 \cdot t; \\ \beta_2(t) = a_2 + b_2 \cdot t, \end{cases} \quad (4)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 – коэффициенты;

φ_1 – первая точка для векторного рангового распределения ранговых фазовых углов;

β_1 – ранговый коэффициент для векторного рангового распределения ранговых фазовых углов;

r_1 – первая точка для векторного рангового распределения ранговых норм;

β_2 – ранговый коэффициент для векторного рангового распределения ранговых норм;

t – время.

В результате последовательной аппроксимации BPP получаются два временных ряда. Первый ряд отражает динамику изменения первой точки второй – рангового коэффициента β .

Расчётный ранг является проекцией фактических значений ранговых фазовых углов и ранговых норм [1, 6]. Векторы расчётных рангов прогнозных BPP ранговых фазовых углов и ранговых норм строятся по выражениям вида

$$\begin{cases} \Phi^*(x) = \frac{\varphi_1(t+1)}{x_p^{\beta_1(t+1)}}; \\ R^*(x) = \frac{r_1(t+1)}{x_p^{\beta_2(t+1)}}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\Phi^*(x)$ – функция прогнозных значений ранговых фазовых углов;

$R^*(x)$ – функция прогнозных значений ранговых норм;

x_p – значение ранговой топологической меры;

t – время.

На завершающем этапе прогнозирования реализуется процедура обратного перехода от прогнозных значений ранговых фазовых углов и ранговых норм к электропотреблению:

$$\begin{cases} \{\Phi_i\}_{i=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_i^{ug}\}_{i=1}^n; \\ \{R_k\}_{k=1}^m \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{norm}\}_{k=1}^m, \end{cases} \quad (6)$$

где $\{W_i^{ug}\}_{i=1}^n$ – множество восстановленных значений электропотребления по значениям ранговых фазовых углов;

$\{W_k^{norm}\}_{k=1}^m$ – множество восстановленных значений электропотребления по значениям ранговых норм.

По завершении процедуры прогнозирования формируются две матрицы прогнозных значений электропотребления, восстановленных по значениям синусов ранговых фазовых углов, и матрица прогнозных значений, полученная в результате применения других методов. Следует отметить, что данные матрицы могут формироваться в результате прогнозирования для множества «сырых», верифицированных и аппроксимационных данных [6].

Оценка точности прогноза может осуществляться на основе значений суммарной относительной ошибки прогноза, относительной ошибки прогноза, суммарной абсолютной ошибки, средней относительной ошибки, максимальной относительной ошибки:

$$\begin{cases} sa = \sum_{i=1}^n |w_i - y_i|; \\ so_i = 100 \frac{|w_i - y_i|}{w_i}; \\ ss = \frac{\left| \sum_{i=1}^n w_i - \sum_{i=1}^n y_i \right|}{\sum_{i=1}^n w_i}; \\ \overline{so} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n so_i; \\ mo = \max(so_i), \quad 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (7)$$

где $i=1, K, n$ – формальный индекс;

n – количество объектов;

y_i – прогнозируемое электропотребление i -го объекта;

w_i – фактическое электропотребление i -го объекта;

ss – суммарная относительная ошибка прогноза по всей системе, %;

so_i – относительная ошибка прогноза для i -го объекта;

sa – суммарная абсолютная ошибка, кВт·ч;

$\overline{so}$ – средняя относительная ошибка, %;

mo – максимальная относительная ошибка, %.

На заключительных этапах методики осуществляется сравнение относительных и абсолютных ошибок, полученных матриц, содержащих прогнозные значения. При сравнении результатов прогнозирования показатели, представленные в выражении (7), преобразуются методом аддитивной свёртки в интегральные критерии прогностических возможностей. В завершение методики лицом, принимающим решение (ЛПР), на основе анализа интегральных показателей прогностических возможностей принимается решение о выборе метода прогнозирования [6].

Заключение

Реализация представленной методики прогнозирования электропотребления объектов на основе ранговых фазовых углов осуществлялась на данных по электропотреблению объектов ПЭК Калининградской области. Временной интервал был взят с 2016 по 2021 гг. за каждый месяц.

Для сравнения прогнозирования электропотребления было реализовано тремя методами: техноценнологическим методом с фиксированной первой точкой (СПТ), техноценнологическим методом без фиксированной первой точкой (БПТ) и методики на основе ранговых фазовых углов.

Оценка точности прогноза производилась по двум критериям: средней относительной ошибке и абсолютной ошибке прогноза. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результат оценки точности прогнозирования по сравнению с 2021 годом

Параметр	Метод прогнозирования без фиксированной первой точки	Метод прогнозирования без фиксированной первой точки	Методика прогнозирования на основе ранговых фазовых углов
Средняя относительная ошибка, %	8,7	5,8	4,1
Абсолютная ошибка, кВт·ч 10^4	1,9	1,7	1,01

Как видно из таблицы 1, значения ошибок прогнозирования электропотребления объектов на основе ранговых фазовых углов по объектам ПЭК

Калининградской области значительно лучше, чем у других методов.

Результативность данной методики была доказана также на выборках региональных электротехнических комплексах других регионах.

Таким образом, представленную методику целесообразно рекомендовать для применения в

среднесрочном и долгосрочном планировании на объектах приморских территорий с целью повышения их энергоэффективности. Кроме того, разработанный математический аппарат может стать основой для создания цифровых сервисов прогнозирования ресурсов различных видов [5].

Литература

1. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ: трактат [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2019. 126 с. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 3-е изд., перераб. и доп. [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
3. Гнатюк В.И. Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению: трактат [Электронный ресурс]. Калининград: Техноценоз, 2020. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (дата обращения: 08.06.2020).
4. Реализация стратегии снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко, С.А. Цырук // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-4 (46). С. 140-145.
5. Viktor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko. Digital platform for management of the regional power grid consumption. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2021, 689(1), 012022.
6. Oleg R. Kivchun. Forecasting electric power consumption of technocenosis objects on the basis of values from transformed vector rank distribution. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2021, 1901(1), 012071.

References

1. Kivchun O.R. Vektorny` rangovy` analiz: traktat [Vector rank analysis]. Kaliningrad: Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Texnocenoz», 2019. 126 s. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroeniya texnocenozov [The law of optimal construction of technocenoses]: monografiya. 3-e izd., pererab. i dop. [E`lektronny` resurs]. Kaliningrad: Izd-vo KICz «Texnocenoz», 2019. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
3. Gnatyuk V.I. Cifrovoy dvojn timer texnocenoza po e`lektropotrebleniyu [The digital twin of the technocenosis in terms of power consumption]: traktat [E`lektronny` resurs]. Kaliningrad: Texnocenoz, 2020. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (data obrashheniya: 08.06.2020).
4. Realizaciya strategii snizheniya e`lektropotrebleniya ob`ektov priportovogo e`lektrotexnicheskogo kom-pleksa na osnove vektornogo rangovogo analiza / V.I. Gnatyuk, O.R. Kivchun, D.V. Lucenko, S.A. Cyruk // Morskie intellektual`ny`e tehnologii. 2019. № 4-4 (46). S. 140-145.
5. Viktor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko. Digital platform for management of the regional power grid consumption. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2021, 689(1), 012022.
6. Oleg R. Kivchun. Forecasting electric power consumption of technocenosis objects on the basis of values from transformed vector rank distribution. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2021, 1901(1), 012071.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Иванович Гнатюк, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Олег Романович Кивчун, кандидат технических наук, доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный документ им. И. Канта, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Victor I. Gnatyuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg Romanovich Kivchun, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the educational and Scientific cluster «Institute of High Technologies», I. Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, Alexander Nevsky str., 14, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2022.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 629.122: 621.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.071>

Анализ судовой гидравлической системы сбора и перекачивания нефтепродуктов

Н.Л. Великанов¹ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, В.А. Наумов¹ vladimir.naumov@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. При работе судна, предназначенного для сбора и перекачивания загрязненных, в том числе и нефтепродуктов, особо важное значение имеют судовые насосные системы. Наличие только паспортных характеристик насосов не позволяет в полной мере оценить особенности работы насосных систем. Разработана физическая модель, учитывающая работу судового насоса в сети. В ней учтены характеристики насоса, параметры трубопровода, характеристики перекачиваемой жидкости. Принято допущение о том, что процесс выборки невода является стационарным, нагрузки квазистатическими. Разработана математическая модель, позволяющая находить рабочую точку насоса в судовой системе сбора и перекачки нефтепродуктов. Приведен пример расчета. Получены зависимости, показывающие влияние диаметра трубопровода, количества поворотов трубопровода на положение рабочей точки.

Ключевые слова: примеси нефтепродуктов, судовые насосные системы, нагрузочные характеристики, рабочая точка.

Для цитирования: Великанов Н.Л., Наумов В.А. Анализ судовой гидравлической системы сбора и перекачивания нефтепродуктов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 110—115.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.071>

Analysis of the vessel hydraulic system for collecting and pumping oily waters

Nikolay L. Velikanov¹ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, Vladimir A. Naumov¹ vladimir.naumov@klgtu.ru,

¹ Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. During the operation of a vessel designed to collect and pump polluted, including oily water, marine pumping systems are of particular importance. The presence of only the passport characteristics of the pumps is not enough to fully assess the features of the pumping systems. A physical model has been developed that takes into account the operation of the ship's pump in the network. It takes into account the characteristics of the pump, the parameters of the pipeline, the characteristics of the pumped liquid. It is assumed that the seine sampling process is stationary, the loads are quasi static. A mathematical model has been developed that makes it possible to find the working point of the pump in the ship's system of collecting and pumping oil-containing waters. An example of calculation is given. Dependences showing the influence of the pipeline diameter, the number of turns of the pipeline on the position of the working point are obtained.

Key words: impurities of petroleum products, marine pumping systems, load characteristics, operating point.

For citation: Nikolay L. Velikanov, Vladimir A. Naumov, Analysis of the vessel hydraulic system for collecting and pumping oily waters, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 110—115.

Введение

Работа судовых систем существенным образом связана с насосными установками и их характеристиками. Особенности работы насосов заключаются в наличии в воде загрязнений и примеси морской соленой воды [1-9].

Загрязнение судов является одним из важнейших факторов, влияющих на экономические выгоды эксплуатируемых судов и морскую экологическую среду (рис. 1).

Это приведет к таким неблагоприятным последствиям, как увеличение потребления энергии, увеличение выбросов углекислого газа, биологическое вторжение и повреждение корпуса. В

статье [6] предложен новый способ очистки судов от загрязнений с помощью подводной кавитационной струи с усилением ультразвуком. Была построена экспериментальная установка для подводной кавитационной струи. Для оценки экспериментальных результатов был использован метод потери массы. Результаты экспериментов показали, что потеря массы образцов значительно возрастает при сочетании погружной кавитационной струи с ультразвуком. Предварительно доказано, что метод усиленной ультразвуком погружной кавитационной струи для очистки судовых загрязнений осуществим. При давлениях насоса 10 МПа и 20 МПа максимальная потеря массы образцов была увеличена на 12,9% и 9,5% соответственно [6].

В работе [3] для изучения характеристик спектра шума судовых насосных агрегатов, индуцируемых различными источниками возбуждения, была создана вычислительная аэроакустическая модель шума внутреннего и внешнего поля судового насоса.

Метод связанных акустических колебаний был использован для получения спектральных характеристик шума внутреннего и внешнего поля. Точность и осуществимость метода моделирования для прогнозирования шума были подтверждены с помощью теста на шум. Из-за различных сред во внутреннем и внешнем полях судового насоса была создана акустическая модель внешнего поля, основанная на технологии автоматически согласованного слоя. Были проанализированы спектральные характеристики различных источников

возбуждения и пространственное распределение излучаемого звукового поля, а также выявлен вклад различных источников возбуждения звука во внутреннее и внешнее звуковое поле. Результаты показывают, что основная частота шума внутреннего поля, создаваемого различными возбуждениями, находится на частоте прохождения лопасти, а шум внутреннего поля, вызванный дипольными акустическими возбуждениями, доминирует на уровне 180,6 дБ. Для шума внешнего поля основная частота по-прежнему находится на частоте прохождения лопасти. Радиационный шум, вызванный возбуждением жидкости (139,2 дБ), выше, чем шум, вызванный дипольными возбуждениями (поверхностный диполь, 136,3 дБ; вращающийся диполь, 137,3 дБ) [3].



Рис. 1. Система очистки судовых балластных вод в мобильной конфигурации InvaSave [5]

Как важная форма технологии передачи энергии по электросетям, электрогидростатический привод широко используется на морских судах и самолетах из-за высоких производительности, надежности и плотности мощности в будущем.

Однако действующие электрогидростатические приводы, применяемые для судовых трюмных насосов, имеют проблему значительного увеличения времени срабатывания. В статье [8] предложена основанная на экспериментальных данных модель функционирования электрогидростатического привода, которая учитывает физическую модель и фактические данные в режиме реального времени. Модель блок-схемы выполняется для имитации электрогидростатического привода в реальных условиях работы. Работа электрогидростатического привода моделируется с помощью параметризованного моделирования. Искусственная нейронная сеть применяется для моделирования функционирования электрогидростатического привода, которая в дальнейшем может быть использована для прогнозирования и управления состоянием электрогидростатического привода в реальных условиях работы. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что предлагаемый метод может хорошо моделировать

время отклика с использованием модели функционирования, что важно для прогнозирования и управления состоянием системы электрогидростатического привода в реальном времени [8].

Осевая насосная система широко используется в судовом двигательном оборудовании и насосных станциях вдоль прибрежных районов рек. В статье [9] построен высокоточный полнофункциональный испытательный стенд для осевой насосной системы и изготовлена модель осевой насосной системы. Система осевого насоса проходит экспериментальные испытания в различных экстремальных условиях. Затем предлагается численная модель для прогнозирования полных характеристик осевой насосной системы, и численные результаты сравниваются с экспериментальными. Показаны полные гидродинамические характеристики рабочего состояния осевой насосной системы, включая состояние насоса, состояние турбины, состояние торможения и различные экстремальные условия эксплуатации. Результаты исследований могут служить основой для безопасной и стабильной работы осевых насосных систем, особенно в различных экстремальных условиях [9].

Насосные системы, работающие с морской водой, оснащаются различными видами насосов [10–12]. Следствием этого являются существенные различия физических и математических моделей, соответствующие этим системам.

2. Исходные данные. Физическая модель

Рассмотрим гидравлическую систему сбора и перекачки нефтесодержащих вод судна «Экос-21» проекта RDB 54.02, разработанного проектно-конструкторским бюро «Стапель» [13]. На судне предусматривается система перекачки и сдачи нефтесодержащих вод, предназначенная для сбора воды загрязненной нефтепродуктами в МО и насосном отделении Пр.Б. Система обслуживается электронасосом ЦВС-10/40 номинальной производительностью 10 м³/ч при давлении 0,4 МПа, который устанавливается в МО, и ручным насосом РН-32, который располагается в насосном отделении Пр.Б.

Сбор нефтесодержащих вод из МО производится электронасосом ЦВС-10/40 в цистерну НВ 1,3 м³, расположенную в трюме по ЛБ в районе 64...69 шп. Цистерна оборудуется горловиной, воздушной и измерительной трубами, датчиками уровня и световой и звуковой сигнализацией о достижении 80% уровня жидкости в цистерне. Сбор нефтесодержащих вод из НО производится ручным насосом РН-32 в танк нефтесодержащих вод №2 Пр.Б. Приемные патрубки в МО и НО оборудуются грязевыми коробками. Электронасосом ЦВС-10/40 производится выдача НВ из цистерны V=1,3 м³ по

трубопроводу DN40 на главную палубу на оба борта для сдачи на судно-сборщик или береговые сооружения. Патрубки выдачи оборудуются специальными фланцами (международного образца) с заглушками. Места выдачи огораживаются приварными комингсами. Предусматривается перекачка нефтесодержащих вод в собственные сборные танки для последующей сдачи в береговые сооружения.

Здесь воспользуемся результатами испытаний, АО «Завод им. Гаджиева» [14], которые включают не только напорную характеристику, но и затраченную мощность, и КПД (точки на рис. 2). Электронасосы ЦВС служат для перекачивания морской (солёной), пресной и питьевой воды температурой до 70°C. Насосы допускают перекачивание воды с примесью нефтепродуктов и механических примесей размером не более 1 мм. Вихревые насосы (ВН) обладают самовсасывающей способностью, что позволяет устанавливать их на высоте до 7 м над поверхностью жидкости. ЦВС обеспечивают безотказную работу в различных условиях, в т.ч. на судах при длительных кренах до 15° и дифферентах до 5°, бортовой качке до ±22,5° с периодами 7–9 сек., килевой до 10° от вертикали, а также при совместном действии бортовой и килевой качки; в режиме самовсасывания не более 15 мин. Насос при работе не создает радиопомех.

В отличие от центробежных насосов, затраченная мощность ВН снижается с ростом подачи (рис. 2б).

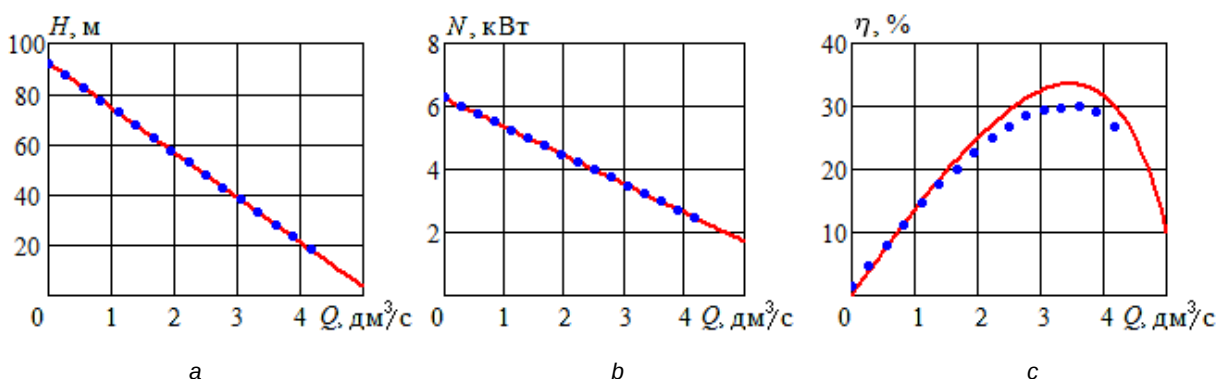


Рис. 2. Рабочие характеристики насоса ЦВС-10/40: а – напор; б – мощность; с – КПД. Точки – экспериментальные данные [14], линии – расчет по формулам (1), (4)

3. Математическая модель

Значения КПД были пересчитаны по формуле (4). Уравнения нагрузочных характеристик ЦВС могут быть аппроксимированы прямыми линиями (1):

$$H \equiv f_1(Q) = H_0 - \alpha Q, \quad N \equiv f_2(Q) = N_0 - \beta Q, \quad (1)$$

где константы H_0 , α , N_0 , β определяются по результатам испытаний. Например, у ЦВС-10/40 на рис. 1: $H_0 = 92,2$ м; $N_0 = 6,27$ кВт; $\alpha = 17,74$ м/(dm^3/s); $\beta = 0,912$ кВт/(dm^3/s).

Как в [15], приведем характеристики к безразмерной форме (2), (3):

$$h \equiv H/H_0 = 1 - q, \quad n \equiv N/N_0 = 1 - q/\theta, \quad (2)$$

$$q = Q/Q_N, \quad Q_N = N_0/\beta, \quad Q_H = H_0/\alpha, \quad \theta = Q_N/Q_H, \quad (3)$$

где Q_H , Q_N – подачи, при которых функции $f_1(Q)$ и $f_2(Q)$ обращаются в нуль, соответственно. У ЦВС-10/40 $Q_H = 5,197 \text{ dm}^3/\text{s}$; $Q_N = 6,875 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Тогда КПД ВН можно рассчитать по формуле (4)

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{N} = \rho g \frac{Q \cdot f_1(Q)}{f_2(Q)} = \rho g \frac{Q(H_0 - \alpha Q)}{N_0 - \beta Q}. \quad (4)$$

На рис. 2с значения КПД (точки), рассчитанные по формуле (4) и графикам (рис. 1а и 1б) оказались несколько выше кривой, приведенной производителем [14]. Скорее всего, это следствие неточности, допущенной на указанном ресурсе.

Из (2)–(4) безразмерная форма КПД ВН (5):

$$\eta \equiv \varphi(q) = K \frac{(1-q)q}{1-q/\theta}, \quad K = \frac{\rho g H_0^2}{\alpha N_0}. \quad (5)$$

По формулам (2), (5) видно, что линейные напорные характеристики (подача – напор) всех ВН являются подобными. Критерием подобия характеристик (подача – затраченная мощность)

является величина θ . При определении КПД ВН имеется два критерия подобия: θ и K . Значения критериев подобия насоса ЦВС-10/40: $\theta = 1,32$; $K = 0,749$.

Как показано в [3], так как $\theta > 1$, функция $\varphi(q)$ имеет максимум при подаче (6):

$$Q_M = Q_N (1 - (1 - 1/\theta)^{0.5}) = 3,48 \text{ дм}^3/\text{с}. \quad (6)$$

На рис. 3 показана безразмерная форма рабочих характеристик ЦВС-10/40.

Запишем формулу (7) для характеристики трубопровода H_T :

$$H_T = H_C + \left(\lambda \frac{L}{d} + \zeta \right) \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g}, \quad (7)$$

где H_C – статический напор (м); d – внутренний диаметр трубопровода (м); L – длина трубопровода (м); λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине трубопровода; ζ – суммарный коэффициент потерь напора в местных сопротивлениях; $V = 4Q/\pi d^2$ – скорость воды в трубопроводе (м/с).

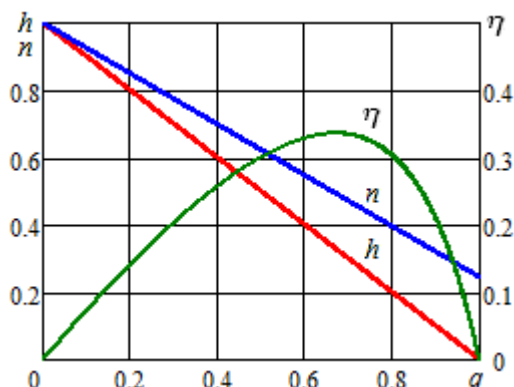


Рис. 3. Безразмерная форма рабочих характеристик ЦВС-10/40

Коэффициент гидравлических потерь на трение будем рассчитывать по известной формуле Альтшуля (8):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где $Re = Vd/\nu$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости воды ($\text{м}^2/\text{с}$); Δ – эквивалентная шероховатость трубопровода (м).

Суммарный коэффициент потерь напора в местных сопротивлениях будем рассчитывать по (9)

$$\zeta = m \cdot \zeta_k + \zeta_m, \quad (9)$$

где ζ_k – коэффициент потерь при внезапном повороте на 90 градусов (колено, принимаем $\zeta_k = 1,3$), m – количество внезапных поворотов трубопровода; ζ_m – суммарный коэффициент потерь других местных сопротивлений (вентилей, задвижек и пр.).

4. Результаты расчетов и дискуссия

Принимаем следующие базовые параметры гидравлической сети: $H_C = 6$ м; $d = 36$ мм; $L = 15$ м; $\zeta_m = 4$; $\Delta = 0,08$ мм; $m = 15$. Полагаем, что содержание нефтяных продуктов в воде невелико $\nu = 1,5 \text{ мм}^2/\text{с}$, поэтому пренебречь изменением рабочих характеристик [15], полученных при перекачивании воды.

На рис. 4 показано влияние количества поворотов трубопровода на положение рабочей точки насосной установки. Если при $m = 5$ подача в рабочей точке $3,94 \text{ дм}^3/\text{с}$, то при $m = 30$ она снижается до $3,27 \text{ дм}^3/\text{с}$. На рис. 5 показано влияние количества диаметра трубопровода на положение рабочей точки насосной установки.

В таблице 1 приведены значения параметров насосной системы, рассчитанные в рабочей точке. при различных значениях диаметра и количества поворотов.

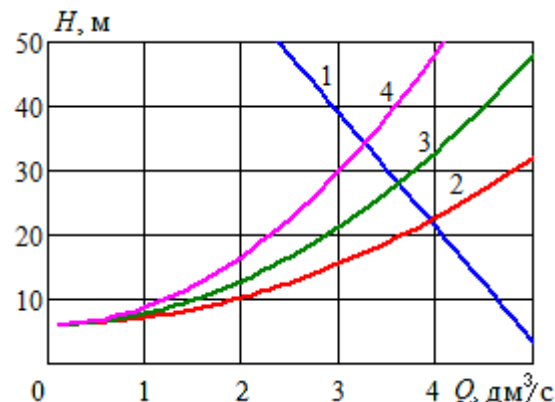


Рис. 4. Влияние количества поворотов трубопровода на положение рабочей точки: 1 – характеристика насоса; 2 – характеристика трубопровода при $m = 5$; 3 – при $m = 15$; 4 – при $m = 30$



Рис. 5. Влияние диаметра трубопровода на положение рабочей точки: 1 – характеристика насоса; 2 – характеристика трубопровода при $d = 31$ мм; 3 – при $d = 36$ мм; 4 – при $d = 42$ мм

С ростом m и уменьшением d растет гидравлическое сопротивление трубопровода, поэтому снижается подача, а напор H увеличивается. Соответственно время T наполнения цистерны ($1,3 \text{ м}^3$) возрастает. При этом КПД изменяется незначительно. Обратим внимание, что значения $Re_d = V \cdot d / \nu < 500$ во всех случаях. Значит, область гидравлического сопротивления в трубопроводе является переходной, а вовсе не квадратичной, как обычно принимают для упрощения, в подобных расчетах.

Таблица 1

Параметры насосной системы в рабочей точке

№ пп.	m	d , мм	Q , $\text{дм}^3/\text{с}$	H_T , м	Re_d	T , мин.	η , %
1	5	36	3,94	22,2	207	5,49	32,1
2	15	36	3,62	28,1	189	5,98	33,4
3	30	36	3,27	34,1	171	6,64	33,3
4	15	31	2,98	39,4	156	7,28	32,3
5	15	42	3,91	22,9	205	5,54	32,4

Заключение

Получены математические выражения для определения рабочей точки насоса, работающего в судовой гидравлической сети. Приведен пример расчета для конкретного судна, проведены расчеты рабочих точек насоса при различных параметрах трубопровода. Показано, что увеличение количества поворотов и уменьшение диаметра трубопровода снижает подачу и увеличивает напор. При этом

растут энергозатраты, а эффективность работы системы перекачки падает. Полученные результаты позволяют более точно определить параметры перекачки жидкости, включая энергозатраты. Результаты можно использовать при проектировании судовых систем, в частности, проведении оптимизации работы судовой гидравлической системы сбора и перекачивания нефтесодержащих вод.

Литература

- Fontaine D., Marshall A., Shukla A. Novel pressure vessel for pressurizing corrosive liquids with applications in accelerated life testing of composite materials. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME. 2021. V. 143, I. 51(055001-1). <https://doi.org/10.1115/1.4050318>.
- Zhang Y., Song D., Wang H., Wang X., Jiang L., Wang Ch., Fan M., Zhao J. Performance fluctuations and evaluation of a piston type integrated high pressure pump-energy recovery device. Clean Water. 2022. V. 5, I. 1 (19). <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00162-5>.
- Li H., Zhou R., Pan Q., Dong L., Ma Q., Cheng Z., Wang X. Noise spectrum characteristics of marine pump units induced by different excitation sources. Scientific Reports. 2022. V. 12, I. 1 (8678). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12755-8>.
- Назначение и классификация судовых насосов [Электронный ресурс]. URL: <https://mirmarine.net/svm/sudovye-nasosy/80-naznachenie-sudovyykh-nasosov> (дата обращения 24.07.2022).
- Система Damen InvaSave [Электронный ресурс]. URL: http://shipsupply.ru/?xml=news&news_cat=5&news_from=481&news_id=29484 (дата обращения 24.07.2022).
- Zhong X., Dong J., Liu M., Meng R., Li Sh., Pan X. Experimental study on ship fouling cleaning by ultrasonic-enhanced submerged cavitation jet: A preliminary study. Ocean Engineering. 2022. V. 25815 (111844). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111844>.
- Wang L., Ma X., Kong H., Jin R., Zheng H. Investigation of a low-pressure flash evaporation desalination system powered by ocean thermal energy. Applied Thermal Engineering. 2022. V. (118523). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118523>.
- Nie S., Gao J., Ma Z., Yin F., Ji H. An artificial neural network supported performance degradation modeling for electro-hydrostatic actuator. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022. V. 44, I. 6 (241). URL: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03518-7>.
- Xiaowen Z., Fangping T. Investigation on hydrodynamic characteristics of coastal axial flow pump system model under full working condition of forward rotation based on experiment and CFD method. Ocean Engineering. 2022. V. 253(111286). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111286>.
- Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И., Пыленок Д.А. Откачка воды из трюма погружным насосом // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2021. № 3 (57). С. 22-25.
- Савина Ю.Э., Великанов Н.Л. Организация работы речного транспорта в Калининграде // Транспортный бизнес и логистика: актуальные аспекты развития. Сборник тезисов II Всероссийской научно-практической конференции. Самара, 2021. С. 64-66.
- Наумов В.А., Великанов Н.Л. Характеристики водокольцевых компрессорных машин вакуумных рыбонасосных установок // Рыбное хозяйство. 2021. № 1. С. 94-98.
- Проектно-конструкторское бюро «Стапель». Судно «Экос-21» [Электронный ресурс]. URL: https://www.stapel.ru/projects/suda-spetsialnogo-naznacheniya/ekologicheskoe-sudno-quot-ekos-21-quot-pr-rdb-54-02/?sphrase_id=2155 (дата обращения: 15.08.2022).
- АО «Завод им. Гаджиева». Электронасос центробежно-вихревой самовсасывающий ЦВС-10/40 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zavodgadzieva.ru/node/57> (дата обращения: 15.08.2022).
- Ахмедова Н.Р., Левичева О.И., Наумов В.А. Критерии подбора установок для перекачивания маловязких пищевых жидкостей вихревыми насосами // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 78-88.

References

- Fontaine D., Marshall A., Shukla A. Novel pressure vessel for pressurizing corrosive liquids with applications in accelerated life testing of composite materials. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME. 2021. V. 143, I. 51(055001-1). <https://doi.org/10.1115/1.4050318>.

2. Zhang Y., Song D., Wang H., Wang X., Jiang L., Wang Ch., Fan M., Zhao J. Performance fluctuations and evaluation of a piston type integrated high pressure pump-energy recovery device. *Clean Water*. 2022. V. 5, I. 1 (19). <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00162-5>.
3. Li H., Zhou R., Pan Q., Dong L., Ma Q., Cheng Z., Wang X. Noise spectrum characteristics of marine pump units induced by different excitation sources. *Scientific Reports*. 2022. V. 12, I. 1 (8678). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12755-8>.
4. Naznachenie i klassifikaciya sudovyh nasosov [Purpose and classification of marine pumps]. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://mirmarine.net/svm/sudovye-nasosy/80-naznachenie-sudovykh-nasosov> (data obrashcheniya 24.07.2022).
5. Damen InvaSave System [Elektronnyj resurs]. URL: http://shipsupply.ru/?xml=news&news_cat=5&news_from=481&news_id=29484 (data obrashcheniya 24.07.2022).
6. Zhong X., Dong J., Liu M., Meng R., Li Sh., Pan X. Experimental study on ship fouling cleaning by ultrasonic-enhanced submerged cavitation jet: A preliminary study. *Ocean Engineering*. 2022. V. 25815 (111844). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111844>.
7. Wang L., Ma X., Kong H., Jin R., Zheng H. Investigation of a low-pressure flash evaporation desalination system powered by ocean thermal energy. *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 118523. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118523>.
8. Nie S., Gao J., Ma Z., Yin F., Ji H. An artificial neural network supported performance degradation modeling for electro-hydraulic actuator. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. V. 44, I. 6 (241). URL: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03518-7>.
9. Xiaowen Z., Fangping T. Investigation on hydrodynamic characteristics of coastal axial flow pump system model under full working condition of forward rotation based on experiment and CFD method. *Ocean Engineering*. 2022. V. 253(111286). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111286>.
10. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I., Pylenok D.A. Otkachka vody iz tryuma pogrzhnym nasosom [Pumping water from the hold with a submersible pump]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2021. № 3 (57). P. 22-25.
11. Savina Yu.E., Velikanov N.L. Organizaciya raboty rechnogo transporta v Kaliningrade [Organization of river transport in Kaliningrad]. *Transportnyj biznes i logistika: aktual'nye aspekty razvitiya. Sbornik tezisev II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Samara, 2021. P. 64-66.
12. Naumov V.A., Velikanov N.L. Harakteristiki vodokol'cevyh kompressornyh mashin vakuumnyh rybona-sosnyh ustanovok [Characteristics of water ring compressor machines of vacuum fish pumping units]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2021. № 1. P. 94-98.
13. Proektno-konstruktorskoe byuro «Stapel». Sudno «Ekos-21» [Design bureau "Stapel". The vessel "Ekos-21"]. [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.stapel.ru/projects/suda-spetsialnogo-naznacheniya/ekologicheskoe-sudno-quot-ekos-21-quot-pr-rdb-54-02/?sphrase_id=2155 (data obrashcheniya: 15.08.2022).
14. AO «Zavod im. Gadzhieva». Elektronasos centrobezhno-vihrevoj samovsasyvayushchij CVS-10/40 [JSC "Plant named after Gadzhieva". Centrifugal vortex self-priming electric pump CVS-10/40]. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.zavodgadzhieva.ru/node/57> (data obrashcheniya: 15.08.2022).
15. Ahmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Kriterii podobiya ustanovok dlya perekachivaniya malovyazkih pishchevyh zhidkostej vihrevymi nasosami [Criteria for similarity of units for pumping low-viscosity food liquids by vortex pumps]. *Izvestiya KG TU*. 2022. № 66. P. 78-88.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Владимир Аркадьевич Наумов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

Vladimir A. Naumov Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: vladimir.naumov@klgtu.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 15.11.2022.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 629.5.015.141:639.2.081.117

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.072>

Математическое моделирование дифферента рыболовного судна при выборке кошелькового невода

Н.Л. Великанов¹ e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru, О.В. Шарков¹ e-mail: oleg.sharkov@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация При работе промыслового судна с кошельковым неводом выделяют стадии замета, кошелькования, выборки. Особого внимания требует процесс выборки, так как при этом со стороны орудия лова на сейнер действуют значительные силы, влияющие на дифферент судна. Разработана физическая модель, учитывающая взаимодействие промыслового судна и кошелькового невода. В ней учтены точки приложения сил натяжения тросов, идущих со стороны лебедок сейнера к орудию лова, параметры кошелькового невода. Принимаем допущение о том, что процесс выборки невода является стационарным, нагрузки квазистатическими. Разработана математическая модель, позволяющая находить параметры дифферента. Приведен пример расчета. Получены зависимости изменения угла дифферента от силы натяжения стяжного троса при разных величинах подъема канифас-блока.

Ключевые слова: сейнер, дифферент судна, кошельковый невод, процесс выборки.

Для цитирования: Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическое моделирование дифферента рыболовного судна при выборке кошелькового невода, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 3, С. 116—121.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.072>

Mathematical modeling of the trim of a fishing vessel when purse seine sampling

Nikolay L. Velikanov¹ e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru, Oleg V. Sharkov¹ e-mail: oleg.sharkov@klgtu.ru

¹ Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. When working fishing vessel with a purse seine, the stages of setting a seine, seine pursing, sampling a seine are distinguished. The sampling process requires special attention, seance at the same time, significant forces affect the sinner from the fishing gear, affecting the trim of the vessel. A physical model has been developed that takes into account the interaction of a fishing vessel and a purse seine. It takes into account the points of application of the tension forces of the cables coming from the seiner inches to the fishing gear, the parameters of the purse seine. The seine sampling process is stationary, the loads are quasi static. A mathematical model has been developed that allows to find the time parameters. An example of calculation is given. The dependence of the change in the angle of the trim on the tension force of the tie cable at different lifting values of the rosin block are obtained.

Key words: seiner, vessel trim, purse seine, sampling process.

For citation: Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov, Mathematical modeling of the trim of a fishing vessel when purse seine sampling, Marine intellectual technologies. 2022. № 4 part 3, P. 116—121.

Введение

Одной из характеристик остойчивости рыболовного судна является способность сохранять угол дифферента в допустимых пределах. В процессе выборки кошелькового невода силы, действующие со стороны орудия лова на корпус судна резко возрастают, что может привести к нарушению остойчивости и втягиванию судна внутрь пространства, обметанного неводом [1–4].

Основными факторами, определяющими остойчивость любого судна являются углы крена θ и дифферента ψ [5–11].

Несмотря на многочисленные отечественные [12–15] и зарубежные [16–19] исследования, посвященные анализу и оценки дифферента различных судов этот вопрос до конца не изучен. Особенно это касается случаев, когда на

остойчивость влияют специфические факторы – такие как силы, действующие при выборке орудий лова.

Рассматриваемая статья посвящена разработке методики расчета угла дифферента рыболовного судна, возникающего в процессе кошелькования невода.

1. Расчетная схема процесса кошелькования

На рис.1 приведена схема (физическая модель) для математического описания процесса выборки стяжного троса в процессе кошелькования невода, базирующая на методики источника [20].

Введем три системы координат – XYZ , $X_1Y_1Z_1$ (трехмерные, связанные с рыболовным судном) и $X_2O_2Y_2$ (двухмерную, связанную с кошельковым неводом).

Точка O начала системы координат XYZ является точкой пересечения основной линии рыболовного судна с мидель-шпангоутом. Оси OX и OZ направлены соответственно к борту где расположена грузовая стрела с канифас-блоком и носу рыболовного судна.

Точка O_1 начала системы координат $X_1Y_1Z_1$ совпадает с точкой схода стяжного троса с канифас-блоком – точкой приложения тягового усилия. Примем

одинаковое направление осей систем координат XYZ и $X_1Y_1Z_1$.

Точка O_2 начала системы координат $X_2O_2Y_2$ совпадает с крайней точкой нижней подборы кошелькового невода.

При этом ось кошелькового невода AB и ось стяжного троса O_2O_1 лежат в одной плоскости $X_2O_2Y_2$.

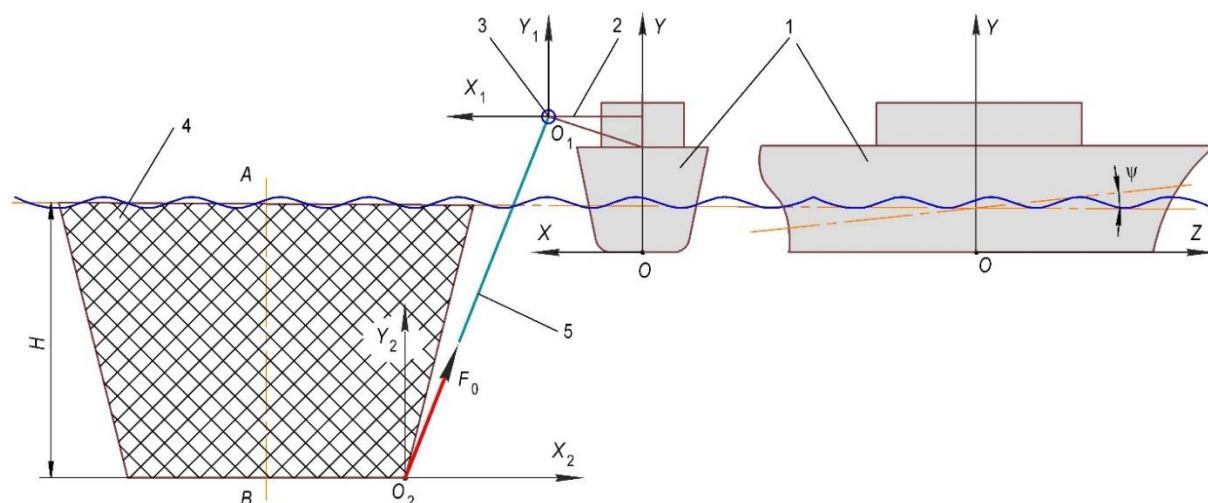


Рис. 1. Расчетная схема определения дифферента судна при выборке кошелькового невода: 1 – рыболовное судно; 2 – грузовая стрела; 3 – канифас-блок; 4 – кошельковый невод; 5 – стяжной трос.

2. Математическая модель

Дифферент рыболовного судна происходит вследствие действия вертикальной проекции силы натяжения стяжного троса на плоскость $X_1O_1Y_1$, которая, при малых углах крена и дифферента, определяется как [21]

$$F_B = -\sqrt{(q[H + (y_{O1} - T)] + F_0)^2 - F_{X0}^2}, \quad (1)$$

где q – сила тяжести погонного метра стяжного троса в морской воде; H – высота кошелькового невода; y_{O1} – координата точки O_1 по оси OY ; T – осадка рыболовного судна без учета действия тягового усилия; F_0 – сила натяжения стяжного троса в нижней точке подборы O_2 .

Сила натяжения стяжного троса равна

$$F_0 = \sqrt{F_{X0}^2 + F_{Y0}^2}, \quad (2)$$

где F_{X0} – сила лобового сопротивления кошелькового невода; F_{Y0} – вертикальная гидродинамическая сила, создающая перегрузку невода.

При дифференте рыболовного судна на угол ψ начинает действовать восстанавливающий момент

$$M_\psi = D(h_0 + \Delta h) \sin \psi, \quad (3)$$

где D – нормальное водоизмещение рыболовного судна; h_0 – продольная метацентрическая высота

рыболовного судна; Δh – изменение продольной метацентрической высоты судна при дифференте.

Для определения изменения величины продольной метацентрической высоты Δh будем использовать метод аналогий. В этом случае рассмотрим случай приема судном малого груза, который составляет не более $(0,10 \dots 0,15) \cdot D$

$$\Delta h = \frac{F_B}{D + F_B} h_0. \quad (4)$$

Изменение осадки судна при дифференте можно определить как

$$\Delta T = \frac{F_B}{w\gamma S}, \quad (5)$$

где w – коэффициент отклонения бортов судна от ватерлинии; γ – удельный вес морской воды; S – площадь ватерлинии судна.

Тогда принимая во внимания выражения (3) и (4) восстанавливающий момент можно определить

$$M_\psi = Dh_0 \left(1 + \frac{F_B}{D + F_B} \right), \quad (6)$$

Момент, вызывающий дифферент, удобно представить как сумму моментов, возникающих от действия вертикальной и горизонтальной составляющей силы натяжения стяжного троса

$$M_D = M_{D1} + M_{D2}, \quad (7)$$

где M_{D1} и M_{D2} – вертикальная и горизонтальная составляющие дифферентующего момента.

Вертикальная составляющая дифференцирующего момента равна

$$M_{D1} = F_B \left[z_{01} \cos \psi + \left(y_{01} - \frac{2T + \Delta T}{2} \right) \sin \psi \right], \quad (8)$$

где z_{01} – координата расположения точки схода стяжного троса с канифас-блока по оси OZ .

Горизонтальная составляющая дифференцирующего момента равна

$$M_{D2} = F_{X0} \cos \alpha_1 [(y_{01} - T) \cos \psi - z_{01} \sin \psi], \quad (9)$$

где α_1 – угол между проекцией силы F_B на плоскость $X_1O_1Z_1$ и осью O_1Z_1 .

Принимая во внимание выражения (7)–(9) полный дифференцирующий момент равен

$$M_D = F_B \left(\frac{z_{01} \cos \psi + (y_{01} - T - F_B)}{2w\gamma S \sin \psi + F_{X0} [(y_{01} - T) - z_{01} \sin \psi]} \times \right. \\ \left. + F_{X0} [(y_{01} - T) \cos \psi - z_{01} \sin \psi] \cos \alpha_1 \right). \quad (10)$$

Когда судно находится в равновесии момент вызывающий дифферент равен восстанавливающему моменту

$$M_\psi = M_D. \quad (11)$$

Принимая во внимание зависимости (6), (10) и (11) выражение для определения угла статического дифферента можно представить как

$$\psi = (z_{01} F_B + F_{X0} [y_{01} - T] \cos \alpha_1) \times \\ \times \left(Dh_0 \left[1 + \frac{F_B}{D + F_B} \right] + F_{X0} z_{01} \cos \alpha_1 - \right. \\ \left. - \left[y_{01} - T - \frac{F_B}{2w\gamma S} \right] F_B \right)^{-1}. \quad (12)$$

Если приравнять работы восстанавливающего (3) и дифференцирующего (10) моментов определим дифферент при мгновенном приложении нагрузки

$$\int_0^\psi M_D d\psi = \int_0^\psi M_\psi d\psi. \quad (12)$$

Тогда динамический угол дифферента $\psi_D = 2\psi$.

3. Результаты расчетов и дискуссия

Полученные зависимости (1)–(12) представляют собой математические модели, позволяющие определить угол дифферента рыболовного судна в процессе выбора стяжного троса с учетом параметров судна и кошелькового невода.

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие закономерности влияния силы натяжения стяжного троса F_0 кошелькового невода и высоты подъема канифас-блока (координата y_{01}) на величину угла дифферента рыболовного судна.

Расчеты проведены для рыболовной системы сейнер-кошельковый невод со следующими характеристиками. Сейнер типа СЧС-150 имеет водоизмещение $D = 963 \cdot 10^3$ Н, среднюю осадку H

$= 1,88$ м; площадь грузовой ватерлинии $S = 89,9$ м² и продольную метацентрическую высоту $h_0 = 0,69$ м.

Средние координаты точки O_1 схода стяжного троса с канифас-балки равны: $x_{01} = 2,8$ м; $y_{01} = 4,0$ м; $z_{01} = 1,8$ м. Кошельковый невод имеет высоту $H = 115$ м и силу тяжести стяжного троса $q = 0,25$ Н.

Как видно из полученных результатов при возрастании силы лобового сопротивления от $10 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$ Н (в 3 раза) угол дифферента также линейно возрастает в среднем в 3 раза.

При увеличении высоты подъема канифас-блока с 2 до 6 м (в 3 раза) угол дифферента линейно увеличивается в среднем в 1,62 раза.

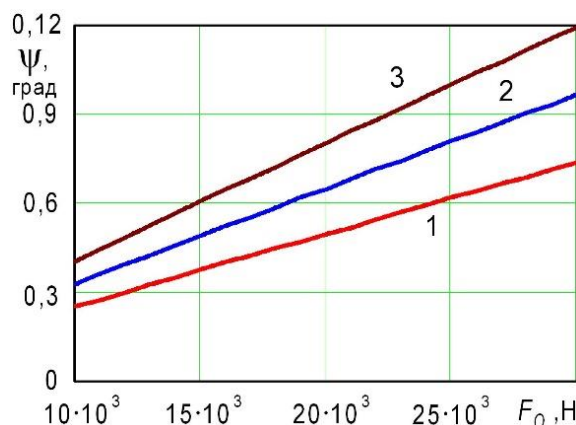


Рис. 2. Изменения угла дифферента от силы натяжения стяжного троса при величине подъема канифас-блока: 1 – 2 м; 2 – 4 м; 3 – 6 м.

Линейный характер изменения угла дифферента объясняется тем, что при малых углах дифферента (не более $1,5 \dots 2,0^\circ$) используется линейная схема построения математической модели [22].

В таблице 1 приведено сравнения величин углов крена [21] и дифферента в зависимости от силы натяжения стяжного троса.

Таблица 1

Углы дифферента и крена					
Сила натяжения F_0 , кН	10	15	20	25	30
Угол дифферента ψ	0°3'	0°5'	0°7'	0°9'	0°10'
Угол крена θ	3°18'	4°40'	6°21'	8°10'	10°1'

Как видно величина угла дифферента в $55 \dots 60$ раз меньше чем для угла крена. Это объясняется тем, что продольная метацентрическая высота судна на несколько порядков больше, поперечная.

Следует заметить, что при угле крена близкого к допустимому ($[\theta] = 10^\circ$) величина угла дифферента существенно меньше предельного ($[\psi] = 2^\circ$).

Заключение

Получены математические выражения для определения: сил, действующих на рыболовное судно со стороны стяжного троса при кошельковании; величины угла дифферента; восстанавливающего и дифференцирующего моментов.

На примере конкретного рыболовного судна проведены расчеты угла дифферента при выборке кошелькового невода. Полученные результаты позволяют определить условия безопасной выборки кошелькового невода (с учетом обеспечения гарантированной остойчивости рыболовного судна).

Литература

1. Будыленко Г.А., Гайков В.З. Кошельковый лов тунцов в индийском океане // Рыбное хозяйство. 2004. №2. С. 28–31.
2. Соловьев А.А., Шугай С.Н. Динамика судна при прицельном кошельковом лове // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2012. Т.15. №3. С. 621–623.
3. Wain G., Guéry L., Kaplan D.M., Gaertner D. Quantifying the increase in fishing efficiency due to the use of drifting FADs equipped with echosounders in tropical tuna purse seine fisheries // ICES Journal of Marine Science. V.78(1). 2021. Pp. 235–245. DOI: 10.1093/icesjms/fsaa216.
4. Isaza-Toro E., Giraldo A., Selvaraj J.J., Ortiz-Ferrín O.O. Standardization of small purse seiner fishing effort and its relation to fishing grounds in the eastern tropical sector of the Eastern Pacific Ocean // Regional Studies in Marine Science. 2020. V.3. 101432. DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101432.
5. Филимонов В. Расчет посадки и дифферента грузовых судов. Москва: ЛитРес, 2020. 210 с.
6. Тришин Н.В. Крен судна в автоматизации управления движением по курсу // Эксплуатация морского транспорта. 2021. №1(98). С. 40–44.
7. Зыонг В.Т. Исследование характеристик остойчивости современных среднетоннажных рыболовных судов наливного типа // Известия КГТУ. 2019. №54. С. 178–186.
8. Каретников В.В., Миляков Д.Ф., Сазонов А.Е. Использование системы определения углов пространственной ориентации объекта для измерения динамического дифферента промерного судна на мелководье // Гирокоспия и навигация. 2017. Т.25. №1(96). С. 128–135.
9. Жинкин В.Б. Влияние дифферента на ходовые качества судна // Судостроение. 2000. №1(728). С. 17–20.
10. Campbell R., Terziev M., Tezdogan. T., Incecik A. Computational fluid dynamics predictions of draught and trim variations on ship resistance in confined waters // Applied Ocean Research. 2022. V.12. 103301. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103301.
11. Ntouras D., Papadakis G., Belibassakis K. Ship bow wings with application to trim and resistance control in calm water and in waves // Journal of Marine Science and Engineering 2022. V.10(4) 492. DOI: 10.3390/jmse10040492.
12. Антоненко С.В., Голобокова Н.Ю. Возможности увеличения дифферента при постановке судов в док // Морские интеллектуальные технологии. 2010. №S. С. 62–67.
13. Ершов А.А., Мищенко В.В. Теоретические основы определения оптимального дифферента судов «Река–Море» // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 40–51.
14. Чурин М.Ю. Влияние дифферента на параметры установившейся циркуляции судна // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2013. № 37. С. 212–217.
15. Савчук В.Д., Хомяков В.Ю. Расчет координат центра тяжести штабеля груза при дифференте малотоннажного судна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. №1(35). С. 36–46.
16. Chuan T.Q., Phuong N.K., Tu T.N., Van Q.M., Anh N.D., Le T.H. Numerical study of effect of trim on performance of 12500DWT cargo ship using ranse method // Polish Maritime Research. 2022. V.29(1). Pp. 3–12. DOI: 10.2478/pomr-2022-0001.
17. Lee J., Kim H., Kwon S. Evacuation analysis of a passenger ship with an inclined passage considering the coupled effect of trim and heel // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2022. V.14. 100450. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100450.
18. Ren H., Xu C., Zhou X., Sutulo S., Guedes Soares C. A numerical method for calculation of ship-ship hydrodynamics Interaction in shallow water accounting for sinkage and trim // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2020. V.142(5). 051201. DOI: 10.1115/1.4046484.
19. Liu Yi., Zou L., Zou Z.J. Computational fluid dynamics prediction of hydrodynamic forces on a manoeuvring ship including effects of dynamic sinkage and trim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2019. V.233(1). Pp. 251–266. DOI: 10.1177/1475090217734685.
20. Великанов Н.Л. Механика кошелькового лова рыбы. Калининград: КГТУ, 2001. 166 с.
21. Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическая модель погружения нижней подборы кошелькового невода на рабочую глубину // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №4-2(50). С. 139–144. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.086.
22. Алиев А.В., Мищенко О.В. Математическое моделирование в технике. Издательство «Институт компьютерных исследований»: Ижевск. 2012. 476 с.

References

1. Budylenko G.A., Gaikov V.Z. Koshel'kovyj lov tuncov v indijskom okeane [Purse-line tuna fishing in the Indian Ocean] Rybnoe hozjajstvo. 2004. No2. Pp. 28–31.
2. Soloviev A.A., Shugai S.N. Dinamika sudna pri price'l'nom koshel'kovom love [Dynamics of the vessel during targeted purse fishing] Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. 2012. V.15. No3. Pp. 621–623.
3. Wain G., Guéry L., Kaplan D.M., Gaertner D. Quantifying the increase in fishing efficiency due to the use of drifting FADs equipped with echosounders in tropical tuna purse seine fisheries. ICES Journal of Marine Science. V.78(1). 2021. Pp. 235–245. DOI: 10.1093/icesjms/fsaa216.
4. Isaza-Toro E., Giraldo A., Selvaraj J.J., Ortíz-Ferrín O.O. Standardization of small purse seiner fishing effort and its relation to fishing grounds in the eastern tropical sector of the Eastern Pacific Ocean. Regional Studies in Marine Science. 2020. V.3. 101432. DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101432.
5. Filimonov V. Raschet posadki i differenta gruzovyh sudov [Calculation of landing and trim of cargo ships]. Moskva: LitRes, 2020. 210 p.
6. Trishin N.V. Kren sudna v avtomatizacii upravlenija dvizheniem po kursu [The roll of the vessel in the automation of course control] Jekspluatacija morskogo transporta. 2021. No1(98). Pp. 40–44.
7. Zuong V.T. Issledovanie harakteristik ostojchivosti sovremennyh srednetonnazhnyh rybolovnyh sudov nalivnogo tipa [Investigation of stability characteristics of modern medium-tonnage fishing vessels of liquid type] Izvestija KGTU. 2019. No54. Pp. 178–186.
8. Karetnikov V.V., Milyakov D.F., Sazonov A.E. Ispolzovanie sistemy opredelenija uglov prostranstvennoj orientacii ob'ekta dlja izmerenija dinamicheskogo differenta promernogo sudna na melkovod'e [Using a system for determining the angles of spatial orientation of an object to measure the dynamic trim of a measuring vessel in shallow water] Girokopiya i navigacija. 2017. V.25. No1(96). Pp. 128–135.
9. Zhinkin V.B. Vlijanie differenta na hodovye kachestva sudna [The effect of trim on the running qualities of the vessel] Sudostroenie. 2000. No1(728). Pp. 17–20.
10. Campbell R., Terziev M., Tezdogan. T., Incecik A. Computational fluid dynamics predictions of draught and trim variations on ship resistance in confined waters. Applied Ocean Research. 2022. V.12. 103301. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103301.
11. Ntouras D., Papadakis G., Belibassakis K. Ship bow wings with application to trim and resistance control in calm water and in waves. Journal of Marine Science and Engineering 2022. V.10(4) 492. DOI: 10.3390/jmse10040492.
12. Antonenko S.V., Golobokova N.Yu. Vozmozhnosti uvelichenija differenta pri postanovke sudov v dok [The possibility of increasing trim when ships are docked] Morskie intellektual'nye tehnologii. 2010. NoS. Pp. 62–67.
13. Ershov A.A., Mishchenko V.V. Teoreticheskie osnovy opredelenija optimal'nogo differenta sudov «Reka–More» [Theoretical foundations for determining the optimal trim of River–Sea vessels] Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. 2021. No3. Pp. 40–51.
14. Churin M.Yu. Vlijanie differenta na parametry ustanovivshejsja cirkuljacii sudna [The effect of trim on the parameters of the steady circulation of the vessel] Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2013. No37. Pp. 212–217.
15. Savchuk V.D., Khomyakov V.Yu. Raschet koordinat centra tjazhesti shtabelja gruza pri differente malotonnazhnogo sudna [Calculation of the coordinates of the center of gravity of the cargo stack at the trim of a low-tonnage vessel] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2016. No1(35). Pp. 36–46.
16. Chuan T.Q., Phuong N.K., Tu T.N., Van Q.M., Anh N.D., Le T.H. Numerical study of effect of trim on performance of 12500DWT cargo ship using ranse method. Polish Maritime Research. 2022. V.29(1). Pp. 3–12. DOI: 10.2478/pomr-2022-0001.
17. Lee J., Kim H., Kwon S. Evacuation analysis of a passenger ship with an inclined passage considering the coupled effect of trim and heel. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2022. V.14. 100450. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100450.
18. Ren H., Xu C., Zhou X., Sutulo S., Guedes Soares C. A numerical method for calculation of ship-ship hydrodynamics Interaction in shallow water accounting for sinkage and trim. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2020. V.142(5). 051201. DOI: 10.1115/1.4046484.
19. Liu Yi., Zou L., Zou Z.J. Computational fluid dynamics prediction of hydrodynamic forces on a manoeuvring ship including effects of dynamic sinkage and trim. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2019. V.233(1). Pp. 251–266. DOI: 10.1177/1475090217734685.
20. Velikanov N.L. Mehanika koshel'kovogo lova ryby [Mechanics of purse-line fishing] Kaliningrad: KGTU, 2001. 166 p.
21. Velikanov N.L., Sharkov O.V. Matematicheskaja model' pogruzenija nizhnej podbory koshel'kovogo nevoda na rabochuju glubinu [Mathematical model of immersion of the purse seine bottom rope to the working depth] Morskie intellektual'nye tehnologii. 2020. V.4-2. Pp. 139–144. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.086.
22. Aliev A.V., Mishchenkova O.V. Matematicheskoe modelirovanie v tehnike [Mathematical modeling in engineering] Izdatel'stvo «Institut komp'juternyh issledovanij»: Izhevsk. 2012. 476 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории механизмов и машин и деталей машин, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: oleg.sharkov@klgtu.ru.

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Oleg V. Sharkov, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the Department of theory of mechanisms and machines and machine parts, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: oleg.sharkov@klgtu.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.18.2022.



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**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанных 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**