

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

01101010100001101110001100100100101100110001011010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)
1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



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



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE



№ 2 Часть 2 2022
№ 2 Part 2 2022

Morskie intelektual'nye tehnologii



Труды
Санкт-Петербургского
государственного морского технического университета



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 часть 2 2022 Сквозной номер 56

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, 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, управление и обработка информации;
Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
Математическое моделирование и численные методы.

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

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

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897
Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ».

Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2022



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 2 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,
- 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

Ф.Ф. Легуша, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской 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
F.F. Legusha, Dr. Sci. (Phys. & Math.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russia
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
- **Александр Исаакович Фрумен**, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Ильич Королев**, к.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Минас Арменакович Минасян**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Андрей Борисович Фомичев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Петрович Марков**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Сергей Васильевич Федоров**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Юлия Олеговна Плехова**, доктор экономических наук, профессор, Институт экономики и предпринимательства ННГУ им. Н.И.Лобачевского
- **Анатолий Владимирович Букшев**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Семёнович Федосенко**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Сергей Юрьевич Развозов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Владимир Анатольевич Жуков**, доктор технических наук, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

- **Виктор Михайлович Козин**, доктор технических наук, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Борис Федорович Дмитриев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Андрей Вениаминович Надежкин**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
- **Сергей Владимирович Антоненко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Максим Владимирович Китаев**, кандидат технических наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет
- **Олег Васильевич Шарков**, доктор технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, доцент
- **Светлана Владимировна Лисиенко**, кандидат экономических наук, доцент, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Станислав Борисович Егоров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Яковлевич Фершалов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Игорь Григорьевич Захаров**, доктор технических наук, профессор, ЦМКБ «Алмаз»
- **Александр Николаевич Ваучский**, доктор экономических наук, ОНТЦ «Румб»

**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
- **Alexander I. Frumen**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Vladimir I. Korolev**, Ph.D. (Eng), professor, Technical Sciences, Admiral Makarov State university of Maritime and Inland shipping
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Minas A. Minasyan**, Dr. Sci (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Gennady P. Kicha**, Dr. Sci (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Andrej B. Fomichev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Boris P. Ionov**, Dr. Sci. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei P. Markov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Stepan Yu. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Sergej V. Fedorov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad State Technical University
- **Yuliya O. Plekhova**, Dr. Sci. (Econ), Professor, the institute of economics and entrepreneurship Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
- **Anatolij V. Bukshev**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Yurij S. Fedosenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport
- **Sergej YU. Razvozov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Vladimir A. Zhukov**, Dr. Sci. (Eng.), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci (Eng.), Associate professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Andrey V. Nadezkin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi

- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI
- **Sergey V. Antonenko**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Maksim V. Kitaev**, Ph.D. (Eng), associate professor, Far Eastern Federal University
- **Oleg V. Sharkov**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Immanuel Kant Baltic Federal University
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng)
- **Svetlana V. Lisienko**, Ph. D. (Econ), Associate Professor, Far Easten state technical fishery University
- **Stanislav B. Egorov**, Ph.D. (Eng), associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Yuriy Ya. Fershalov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Far Eastern Federal University
- **Igor G. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ZMKB "Almaz"
- **Alexander N. Vauchskii**, Dr. Sci. (Eng), Rumb Research Center



51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

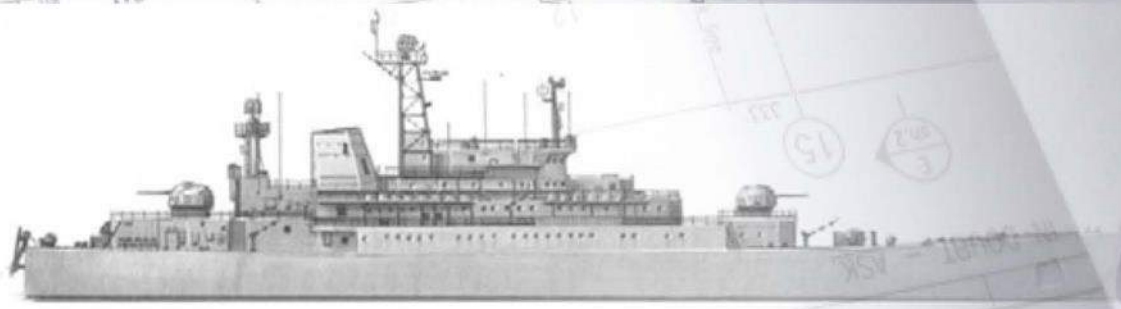
Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email: office@51cktis.ru

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

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

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

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





**ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Суслов А.Н., Линник Е.Ю. Метод определения массы корпуса наливных судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования.....	15
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Борисов Р.В., Лузянин А.А., Безопасность судна, качающегося под действием нерегулярных ветра и волн.....	22
Добродеев А.А. Изменчивость физико-механических свойств моделированного льда гранулированного типа в ходе эксперимента.....	29
Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна в условиях мелководья.....	37
Яковлев А.Ю., Чепурко С.И. Метод расчета гребного лопастного движителя на основе плоских сечений.....	46
Гежа Д.В., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Оценка влияния на параметры вибрации валопровода силы упора вращающегося гребного винта.....	53
Чебан Е.Ю., Никущенко Д.В., Мартемьянова О.В., Лукина Е.А., Тихобаев М.Ю. Оценка сопротивления вспомогательного судна внутреннего плавания приближенными методами.....	59
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Зубарев Ю.М., Круглов А.И. Афанасенков М.А. Повышение работоспособности лезвийного режущего инструмента методом ионно-вакуумной модификации рабочих поверхностей.....	66
Равин А.А., Хруцкий О.В., Алексеев А.В. Мониторинг безопасности эксплуатации объектов морской техники на основе акустико-эмиссионного контроля.....	72
Баранец И.В., Бобков А.Д., Краснов А.В., Легуша Ф.Ф., Никитин Г.А., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю. Влияние СВЧ-электромагнитного поля на физико-химические процессы, протекающие в эпоксидном клее ДМ-5-65.....	79
Евтуховская О. А., Агиевич М. А., Агапов К.А., Жданова М.А., Грибанькова А.А. Исследование антикоррозионного поведения низкоуглеродистой стали в средах с СРБ в присутствии производных фенотиазина	87
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Румб В.К. Прогнозирование долговечности судовых дейдвудных подшипников.....	94
Титова Ю.Ф., Яковлев С.Н., Подколызина Л.В., Бабанин Н.В. Экспериментальное определение частоты свободных колебаний полиуретановых виброизоляторов, применяемых в судостроении.....	100
Гоняева С.С., Калмыков А.Н., Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Маловик Д.С., Морозов Н.А. Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах.....	106
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Ермолаев Э.В., Махов В.И. Малогабаритная гидроакустическая антенна подводного аппарата.....	111
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Роль масштабного фактора, при взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей.....	115
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ	
Чихонадских Е.А., Песоцкая Е.В., Черкаев Г.В. Метод инженерного прогнозирования в формировании управленческих решений с помощью компьютерных технологий в судостроении.....	119

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении.....	125
Павловский В.А. Степенное обобщение формулы теплопроводности Фурье и вытекающие из него варианты для записи уравнения энергии.....	133
Нечаев Ю.И., Никущенко Д.В. Функции интерпретации динамики подводных объектов в нестационарной среде.....	139

CONTENTS	Page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Alexander N. Suslov, Elena Y. Linnik Method for determining the weight of the hull of ice-going tankers at the initial stages of design.....	15
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Rudolf V. Borisov, Alexandr A. Luzianin The safety of a ship swaying under the influence of irregular winds and waves.....	22
Aleksei A. Dobrodeev Variations in physical and mechanical properties of model fine-grained ice during experiment.....	29
Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev Determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions in shallow water conditions.....	37
Aleksey Yu. Yakovlev, Sergey I. Chepurko Calculation method of paddling blades propulsor based on the flat sections theory.....	46
Daria V. Gezha, Armen L. Melkonian, Dmitry A. Nikolaev Evaluation of the impact on the vibration parameters of the shafting of the stop force of the rotating propeller.....	53
Egor Yu. Cheban, Dmitry V. Nikushchenko, Olga V. Martmianova, Evgeniya A. Lukina, Michael Yu. Tikhobaev Study of the service vessel's hydrodynamic characteristics by approximate methods.....	59
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Yuri M. Zubarev, Andrey I. Kruglov, Michail A. Afanasev Improving the workability of blade cutting tools by the method of ion-vacuum modification of working surfaces.....	66
Alexander A. Ravin, Oleg V. Khrutsky, Anatoliy V. Alexseev Monitoring the safety of marine equipment operation based on acoustic emission control.....	72
Irina V. Baranets, Aleksandr D. Bobkov, Aleksey V. Krasnov, Fedor F. Legusha, Sergey I. Pugachev, Evgeny Yu. Rytov The effect of the microwave electromagnetic field on the physico-chemical processes occurring in the epoxy glue DM-5-65.....	79
Olesya A. Evtukhovskaya, Maria A. Agievich, Konstantin A. Agapov, Marina A. Zhdanova, Anzhela A. Gribankova Study of anti-corrosion behavior low carbon steel in medium with SRB-in the presence of phenothiazine derivatives.....	87
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Viktor K. Rumb Predicting the Durability of Marine Deadwood Bearings.....	94
Yuliana F. Titova, Stanislav N. Yakovlev, Lyudmila V. Podkol'zina, Nikolaj V. Babanin Experimental determination of the frequency of free vibrations of polyurethane vibration isolators used in shipbuilding.....	100
Sofya S. Gonyaeva, Andrey N. Kalmikov, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita D. Koshkin, Dmitry S. Malovik, Nikita A. Morozov Use of a steam-water jet apparatus as a propulsion device on high-speed vessels.....	106
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Edward V. Ermolaev, Vladimir I. Makhov Small-sized hydroacoustic antenna of an underwater vehicle.....	111
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovsky The role of the scale factor in the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields.....	115
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Elena A. Chikhonadskikh, Elena V. Pesotskaya, Georgii V. Cherkaev The method of engineering forecasting in the formation of management decisions using computer technologies in shipbuilding.....	119

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves.....	125
Valery A. Pavlovsky A power-law generalization of the Fourier thermal conductivity formula and the resulting variants for writing the energy equation.....	133
Yuri I. Nechaev, Dmitry V. Nikushchenko Interpretation function of dynamic of an underwater vehicle in non-stationary environment.....	139

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.542:629.5.013.1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.036>

Метод определения массы корпуса наливных судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования

А.Н. Суслов¹ suslov-smtu@yandex.ru, Е.Ю. Линник¹ zjillz@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье предлагается метод определения массы корпуса наливных судов ледового плавания для начальных стадий проектирования. В основе предлагаемого метода лежит использование зависимостей, полученных путем регрессионного анализа результатов прямого расчета массы корпусных конструкций наливного судна и использование данных судна-прототипа. Прямым расчетом определялись массы наружной и внутренней обшивки, поперечного и продольного набора, верхней палубы и главных продольных и поперечных переборок, как наиболее влияющие на массу корпуса и зависимые от ледового класса элементы нагрузки. Прямой расчет массы корпусных конструкций проводился для каждого ледового класса по классификации РМРС в диапазоне проектных скоростей $11 \leq v \leq 17$, уз, с учетом конструктивных особенностей, характеризующих принадлежность судна к определенному ледовому классу. Полученные зависимости для расчета массы корпуса в первом приближении, могут быть использованы в математической модели проектирования наливного судна ледового плавания при определении водоизмещения порожнем и последующей оценке стоимости постройки судна.

Ключевые слова: проектирование, наливное судно, ледовый класс, масса корпуса, математическая модель

Для цитирования: Суслов А. Н., Линник Е. Ю. Метод определения массы корпуса наливных судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 15—21.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.036>

Method for determining the weight of the hull of ice-going tankers at the initial stages of design

Alexander N. Suslov¹ suslov-smtu@yandex.ru, Elena Y. Linnik¹ zjillz@yandex.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article proposes a method for determining the weight of the hull of ice-going tankers for the initial stages of design. The proposed method is based on the use of dependencies obtained by regression analysis of the results of direct calculation of the weight of hull structures of a tanker and the use of data from a prototype vessel. The weights of the outer and inner shell, the transverse and longitudinal framework, the upper deck and the main longitudinal and transverse bulkheads were determined by direct calculation as the load components that most affect the weight of the hull and depend on the ice class. The direct calculation of the weight of hull structures was carried out for each ice class according to the RMRS classification in the range of design speeds $11 \leq v \leq 17$, kn, taking into account the design features characterizing the ship's belonging to a certain ice class. The obtained dependences for calculating the weight of the hull in the first approximation can be used in the mathematical model of designing ice-going tanker when determining the lightweight and subsequent assessment of the cost of building the vessel.

Keywords: design, tanker, ice class, structural weight, mathematical model

For citation: Alexander N. Suslov, Elena Y. Linnik, Method for determining the weight of the hull of ice-going tankers at the initial stages of design, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 15—21.

Введение

Разработка перспективных нефтегазоносных областей российского арктического шельфа в долгосрочной перспективе повлечет за собой необходимость создания новых транспортных систем вывоза углеводородов в условиях акватории морей Северного ледовитого океана. На фоне геополитической напряженности в условиях санкционного давления со стороны стран Запада и прогрессирующего смещения полюсов экономического развития в сторону стран Азии,

мощности новых проектов освоения углеводородных ресурсов российской Арктики могут быть направлены на удовлетворение растущих потребностей Азиатско-Тихоокеанского региона в углеводородах. Складывающаяся ситуация влечет для проектантов новые вызовы, связанные с расширением сроков навигации по трассам Северного морского пути в восточном направлении [1] и исследованием возможностей сокращения возникающих в этой связи транспортных издержек.

Актуальной является задача по разработке проектных методик, позволяющих оценить технико-

экономические показатели наливных судов ледовых классов на уровне технического предложения. Одним из важнейших экономических показателей является стоимость постройки судна, первостепенное влияние на величину которой имеет значение его водоизмещения порожнем.

Выбор близкого прототипа для пересчета составляющих водоизмещения порожнем наливных судов ледовых классов Arc4 и выше, затруднен отсутствием достаточного количества таких судов, построенных в соответствии с требованиями [2]. Так же, ситуация усугубляется тем, что информация о весовой нагрузке современных наливных судов арктических ледовых классов является коммерческой тайной и практически не доступна широкому кругу проектантов и исследователей.

Целью данной работы является создание расчетной базы, которая может быть использована при определении водоизмещения порожнем наливных судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования. Основной задачей, позволяющей достичь поставленной цели, является разработка метода расчета массы корпуса наливных судов ледового плавания, как наиболее значимой составляющей водоизмещения порожнем в части влияния на его величину в зависимости от ледового класса. В статье предлагается подход к данному расчету, основанный на использовании зависимостей, полученных путем регрессионного анализа результатов прямого расчета массы корпусных конструкций наливного судна в зависимости от ледового класса и проектной скорости и использовании данных судна-прототипа.

Расчетная схема корпусных конструкций и принятые допущения

Областью применения разработанного метода расчета массы корпуса являются нефтеналивные суда ледовых классов Российского морского регистра судоходства, определяемые как стальные однопалубные самоходные суда неограниченного района плавания, с минимальным надводным бортом, с кормовым расположением машинного отделения и жилой надстройки, с поперечными водонепроницаемыми переборками, с одной продольной водонепроницаемой переборкой в диаметральной плоскости, с двойным дном и двойными бортами, соответствующие МАРПОЛ 73/78.

Расчет массы корпусных конструкций проводился для судов размерной сетки в диапазоне $5000 \leq DW \leq 165000$, т, главные размерения которых были определены путем использования регрессионных зависимостей, полученных в [3]. Планируемый срок службы судна 40 лет.

Размеры элементов конструкций ледовых усилений в зависимости от ледового класса, определялись прямым расчетом в соответствии с требованиями части II Правил РС «Корпус» [2]. Требования к районам ледовых усилений по длине корпуса судна применялись без использования концепции DAS (double acting ship – судно двойного действия). Для судов всех ледовых классов принята форма носовой оконечности с наклонным форштевнем.

Требованиями [2] регламентируются верхние значения угла наклона расчетной ледовой

ватерлинии на носовом перпендикуляре α_0 и нижние значения угла наклона шпангоута на уровне расчетной ледовой ватерлинии: на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра $\beta_{0,05L}$ и на мидель-шпангоуте β_{mid} . На начальных стадиях проектирования, точные данные о параметрах формы обводов носовой оконечности не доступны ввиду отсутствия разработанного теоретического чертежа. В данной работе значения углов α и β в пределах длины носового заострения для судов ледовых классов Arc5-Arc7 приняты согласно [4] и являются параметрами формы корпуса современного наливного судна типа «Василий Динков», имеющего ледокольную форму носовой оконечности. Для судов остальных ледовых классов, принята линейная зависимость изменения этих углов по длине носового заострения относительно базовых значений, указанных в [2]. Расчетные значения параметров формы корпуса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры формы корпуса

Параметр	Ледовый класс				
	Arc9 Arc8	Arc7 Arc6	Arc5	Arc4	Ice3 Ice2
α_0 , град	30	38	38	40	50
$\beta_{0,05L}$, град	45	54	54	20	15
β_{mid} , град	15	0	0	0	0

Протяженность носового заострения судов всех ледовых классов принята в размере 20% длины судна, поскольку согласно [4], значение этой величины у современных транспортных судов ледового плавания обычно не превышает 20-25% длины судна.

Размеры связей вне районов ледовых усилений определялись в соответствии с требованиями Общих правил МАКО по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов [5] по упрощенной методике с учетом требований к листовым конструкциям судов ледовых классов согласно [2]. В общем случае, определение размеров связей согласно [5], предполагает проведение расчетов для семи динамических случаев нагрузки, отвечающих максимальному значению ответной реакции определенного типа на расчетную волновую нагрузку (например, перемещение при бортовой качке, гидродинамическое давление в районе ватерлинии на мидель-шпангоуте и т.д.). Вычисления должны проводиться в два этапа: проектировочный с использованием аналитических формул и проверочный методом конечных элементов. Такой подход предполагает моделирование корпусных конструкций и проведение последующих расчетов с использованием специальных программных средств, что не представляется возможным для проведения массовых расчетов в рамках данной работы. Для упрощения вычислений первого этапа, в качестве расчетного динамического случая нагрузки был избран случай HSM (head sea moment), соответствующий максимальному (или минимальному) значению вертикального изгибающего момента на мидель-шпангоуте от воздействия встречной волны, как наиболее опасный случай для общей продольной прочности судна.

Определение размеров конструктивных элементов проводилось для миделевого сечения. Проверка устойчивости и усталостной долговечности на первом этапе и второй этап, предполагающий глобальный анализ конструкции методом конечных элементов, не проводились.

Предел текучести материала корпусных конструкций принимался $R_{ен} = 235$ МПа или $R_{ен} = 390$ МПа для судов ледовых классов Ice1-Ice3 и $R_{ен} = 390$ МПа – для судов ледовых классов Arc4-Arc9.

Принцип организации расчета массы корпуса

Разбивка нагрузки масс судна на составляющие элементы принята по ОСТ5Р.0206–2002 [6]. В общем виде массу раздела 01 «Корпус», представим как сумму масс:

$$P_{01} = p_1 + p_2 + p_3,$$

где p_1 - массы элементов нагрузки, определяемые прямым расчетом в зависимости от ледового класса судна; p_2 - массы элементов нагрузки, определяемые методом пересчета с прототипа; p_3 - массы конструкций жилой надстройки, бака и юта, определяемые по приближенной методике, изложенной в [7].

В качестве судна-прототипа для пересчета масс элементов нагрузки по разделу 01 «Корпус», прямой расчет которых не проводился, принято наливное судно проекта 15781, тип Русь (Капитан Бармин), ИМО: 9269350, имеющее ледовый класс L3 (Ice2). Основные проектные характеристики этого судна приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики судна проекта 15781, тип Русь (Капитан Бармин)

L, м	B, м	H, м	T, м	Δ, т	DW, т	v, уз
128,66	16,5	6,5	4,43	8482	5742	11

В табл. 3 указаны значения принятых измерителей масс и виды модулей по разделу 01 «Корпус».

Таблица 3

Измерители масс по разделу 01 «Корпус»

Код и наименование элемента нагрузки по [6]	Измеритель	Модуль
0101 Корпус металлический		
01010101 Обшивка наружная	Прямой расчет по верхнюю палубу	-
01010102 Настил второго дна		
01010103 Набор продольный междуудонный (в т. ч. в оконечн.)		
01010104 Набор поперечный междуудонный (в т. ч. в оконечн.)		
01010105 Набор бортов продольный (в т. ч. в оконечн.)		
01010106 Набор бортов поперечный (в т. ч. в оконечн.)		
01010110 Штевни, кронштейны, мостики, насадки, поковки корпуса	0.026	LBH ^{2/3}
01010112 Металлические части привальных брусьев	0.016	
01010113 Кингстонные и ледовые ящики, корпусные патрубки		

01010201 Палуба верхняя	Прямой расчет	-
01010211 I платформа	0.012/ 0.16	LB/ LB ^{2/3}
01010221 Легкие настилы	0.002/ 0.044	LBH/ LBH ^{2/3}
01010301 Переборки главные поперечные	Прямой расчет	-
01010302 Переборки главные продольные		
01010303 Переборки второстепенные и выгородки	0.006/ 0.132	LBH/ LBH ^{2/3}
01010404 Фальшборты, волноломы, переходные мостики	0.054	LBH ^{2/3}
01010405 Мачты с площадками	0.001	
01010406 Кожухи дымовых труб	0.013	
010105 Конструкции специальные	0.003	
010106 Выступающие части	0.030	
0102 Подкрепления, фундаменты	0.002/ 0.057	LBH/ LBH ^{2/3}
0103 Дельные вещи	0.114	LBH ^{2/3}
0104 Неметаллические части корпуса	0.001	
0105 Покрываются, окраска		
010501 Покрываются, цементировка корпуса, протекторы	0.019	LB
010502 Окраска	0.08	LBH ^{2/3}
0106 Изоляция и зашивки	0.23	
0107 Воздух в корпусе	0.0004	Δ
0108 Оборудование помещений	0.039	LBH ^{2/3}

Для судов, близких по размерениям к выбранному прототипу, для вычисления масс статей 01010211, 01010221, 01010303 и группы 0102, модули принимались в степени 1. Для судов, значительно больших, чем выбранный прототип, относящихся к размерным группам Panamax, SuezMax, Aframax, модули для указанных статей принимались в степени 2/3.

Масса кичных подкреплений и ребер жесткости, относящихся к рамному набору, балкам основного набора и листовым конструкциям, не рассчитывались. Указанная неточность компенсируется тем, что масса проницаемых связей рассчитывалась как масса сплошных. Согласно [8], такой подход обеспечивает приемлемую точность конечного результата вычислений массы корпусных конструкций.

Массы p_1 в пределах длины цилиндрической вставки рассчитывались в предположении, что цилиндрическая вставка наливных судов имеет форму параллелепипеда, две длинные грани которого закруглены в районе двойного дна. У судов ледовых классов Arc8-Arc9, стенки параллелепипеда имеют слом на угол 15 градусов на высоте принятой осадки судна. Длина цилиндрической вставки принималась в размере длины среднего района ледовых усилений B по длине корпуса, что в процентном соотношении от длины судна в зависимости от ледового класса составляет от 60 до 70%.

Для определения масс p_1 в оконечностях, выполнялись следующие шаги:

1. Определялся коэффициент общей полноты δ по его связи с числом Фруда: Fr [9] с позиции

обеспечения ходкости на чистой воде в характерном для наливных судов диапазоне скоростей $11 \leq v \leq 17$ уз:

$$\delta = 1,05 - 1,4Fr - x,$$

где $x = 0,06$ - коэффициент, учитывающий меньшее значение δ у судов ледовых классов Arc8, Arc9; $x = 0$ для судов ледовых классов Ice1-Ice3, Arc4- Arc7.

2. Определялось объемное водоизмещение судна V , м³, по формуле:

$$V = \delta LBT,$$

где L , B , T - длина, ширина и осадка судна соответственно, м, определяемые согласно [3].

3. Определялся объем оконечностей ниже грузовой ватерлинии путем вычитания объема цилиндрической вставки ниже грузовой ватерлинии из полученного значения объемного водоизмещения.

4. Определялся объем описанного параллелепипеда оконечностей ниже грузовой ватерлинии, а затем определяется коэффициент полноты оконечностей ниже грузовой ватерлинии путем деления полученного ранее объема оконечностей на объем описанного параллелепипеда.

5. Определялся коэффициент общей полноты корпуса судна по главную палубу δ_{max} путем использования эмпирической формулы, суть которой заключается в том, что полный объем корпуса судна представляется как сумма объемного водоизмещения и запаса плавучести:

$$\delta_{max} = \frac{\delta T}{H} + 1,05\alpha \left(1 - \frac{T}{H}\right),$$

где H - высота борта судна, м, определяемая согласно [3]; $\alpha = 0,97\delta^{1/2}$ - коэффициент полноты конструктивной ватерлинии [9]. Предполагается, что значение α в пределах высоты надводного борта несколько увеличится на величину 1,05.

6. Определялся объем корпуса судна по главную палубу как:

$$V_{max} = \delta_{max} LBH.$$

7. Определялся объем оконечностей по главную палубу путем вычитания значения объема цилиндрической вставки по главную палубу из полученного значения объема корпуса по главную палубу.

8. Определялся объем запаса плавучести в оконечностях путем вычитания объема оконечностей ниже грузовой ватерлинии из полученного значения объема оконечностей по главную палубу.

9. Определялся объем описанного параллелепипеда оконечностей выше грузовой ватерлинии, а затем определялся коэффициент полноты оконечностей выше грузовой ватерлинии путем деления полученного ранее объема запаса

Для судов размерных групп Small-PanaMax:

$$\rho_1 = \left[(1,001 + a_1) \cdot 10^{-7} \cdot LBH^2 + (4,461 + b_1) \cdot 10^{-2} \cdot LBH + (3,73 + c_1) \cdot 10^2 \right] \cdot k_{235}, \quad (1)$$

где a_1 , b_1 , c_1 - коэффициенты регрессии (табл. 4); k_{235} - коэффициент влияния предела текучести материала $R_{eH} = 235$ МПа на массу корпусных конструкций судов ледовых классов Ice1-Ice3. $k_{235} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot LBH + 1,0881$ - для судов размерных групп

плавучести в оконечностях на объем описанного параллелепипеда.

Для прямого расчета масс ρ_1 в оконечностях, оконечности представляются в виде двух описанных параллелепипедов, расположенных ниже и выше ватерлинии, массы которых уменьшаются на полученные коэффициенты полноты оконечностей ниже и выше ватерлинии. Расчет проводится с принятым допущением, что коэффициенты полноты оконечностей равны для носа и кормы.

Анализ полученных результатов

Характер зависимостей масс ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 от кубического модуля LBH, $v = 17$, уз, представлен на рис. 1.

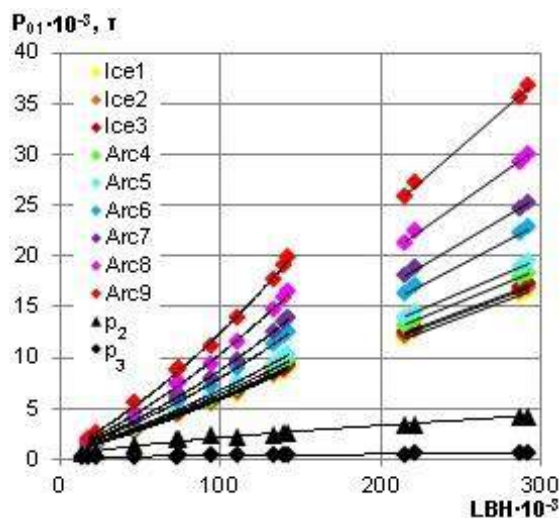


Рис. 1. Зависимости масс ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 от кубического модуля LBH, $v = 17$, уз

Зависимости масс ρ_1 от модуля LBH судов размерных групп Small-PanaMax выражены полиномиальной зависимостью второй степени, поскольку при постоянной ширине судов размерной группы PanaMax, некоторое увеличение L , H и T вызывает нелинейный прирост масс корпусных конструкций, в большей степени за счет увеличения площади бортовых районов ледовых усилений. Для судов размерных групп AfraMax и SuezMax, эта зависимость аппроксимируется как линейная.

Посредством регрессионного анализа результатов массовых расчетов, получены зависимости для определения масс ρ_1 , зависящих от ледового класса судна и проектной скорости v , и масс ρ_2 , ρ_3 :

Small-PanaMax; $k_{235} = 7 \cdot 10^{-7} \cdot LBH + 1,1047$ - для судов размерных групп AfraMax, SuezMax; в остальных случаях $k_{235} = 1$.

$$\rho_1 = \left[(0,0577 + a_2) \cdot LBH - (410,43 + b_2) \right] \cdot k_{235}, \quad (2)$$

где a_2 , b_2 - коэффициенты регрессии (табл. 4).

$$\rho_2 = 1,2102 \cdot LBH^{0,6486} \quad (3)$$

$$\rho_3 = 1,7298 \cdot LBH^{0,4612} \quad (4)$$

При расчете массы раздела 01 «Корпус», массы ρ_1 могут быть определены с использованием

зависимостей (1) и (2), а для определения масс ρ_2 и ρ_3 могут быть использованы данные о нагрузке более близких прототипов к проектируемому судну.

Таблица 4

Значения коэффициентов регрессии в зависимостях 1, 2

Ледовый класс	11, уз					12, уз				
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂
Ice1	-0.0831	0.604	0.58	0.0046	-26.86	-0.0693	0.504	0.48	0.0039	-22.4
Ice2	-0.1051	0.815	0.54	0.006	-42.59	-0.0898	0.708	0.43	0.0052	-35.7
Ice3	-0.0879	0.938	0.60	0.0077	64.97	-0.0722	0.827	0.48	0.0069	71.52
Arc4	-0.001	1.214	0.61	0.0119	68.32	0.015	1.092	0.49	0.011	79.6
Arc5	0.14	1.444	1.00	0.016	144.65	0.157	1.317	0.88	0.015	155.91
Arc6	0.929	1.803	2.74	0.0312	823.37	0.944	1.659	2.59	0.0301	833.27
Arc7	1.36	2.275	3.37	0.0414	955.17	1.371	2.109	3.19	0.04	971.87
Arc8	1.714	3.921	2.95	0.0613	1167.67	1.724	3.697	2.72	0.0595	1200.77
Arc9	1.318	6.919	0.81	0.0859	2246.27	1.327	6.639	0.54	0.0836	2288.37
Ледовый класс	13, уз					14, уз				
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂
Ice1	-0.0554	0.403	0.38	0.0031	-17.93	-0.0416	0.302	0.29	0.0023	-13.46
Ice2	-0.0745	0.600	0.33	0.0044	-28.82	-0.0592	0.493	0.22	0.0036	-21.93
Ice3	-0.0564	0.716	0.37	0.0061	78.08	-0.0407	0.605	0.26	0.0052	84.63
Arc4	0.03	0.969	0.36	0.0101	90.88	0.046	0.847	0.24	0.0092	102.16
Arc5	0.174	1.190	0.75	0.0141	167.18	0.191	1.064	0.63	0.0132	178.44
Arc6	0.958	1.514	2.44	0.0289	843.27	0.973	1.370	2.29	0.0278	853.17
Arc7	1.381	1.944	3.00	0.0387	988.57	1.391	1.778	2.81	0.0373	1005.37
Arc8	1.734	3.474	2.50	0.0577	1233.87	1.744	3.250	2.27	0.056	1266.97
Arc9	1.336	6.359	0.27	0.0813	2330.47	1.344	6.079	-0.01	0.0791	2372.67
Ледовый класс	15, уз					16, уз				
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂
Ice1	-0.0278	0.202	0.19	0.0016	-9	-0.0139	0.101	0.095	0.0008	-4.53
Ice2	-0.0439	0.386	0.12	0.0028	-15.04	-0.0286	0.279	0.009	0.0020	-8.16
Ice3	-0.0249	0.494	0.15	0.0044	91.18	-0.0092	0.382	0.033	0.0035	97.74
Arc4	0.062	0.725	0.11	0.0082	113.45	0.077	0.603	-0.013	0.0073	124.73
Arc5	0.208	0.937	0.50	0.0122	189.7	0.225	0.810	0.376	0.0113	200.96
Arc6	0.987	1.226	2.14	0.0266	863.07	1.002	1.082	1.994	0.0255	872.97
Arc7	1.401	1.612	2.62	0.0359	1022.07	1.411	1.446	2.436	0.0346	1038.77
Arc8	1.435	3.416	1.23	0.0542	1300.07	1.765	2.803	1.826	0.0524	1333.17
Arc9	1.188	5.999	-0.71	0.0768	2414.77	2.423	4.256	2.028	0.0791	2372.67
Ледовый класс	17, уз									
	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂					
Ice1	0	0	0	0	0					
Ice2	-0.013	0.171	-0.094	0.0012	-1.23					
Ice3	0.007	0.271	-0.077	0.0027	104.33					
Arc4	0.093	0.481	-0.136	0.0064	136.03					
Arc5	0.242	0.684	0.249	0.0103	212.26					
Arc6	1.015	0.938	1.844	0.0244	882.87					
Arc7	1.421	1.281	2.247	0.0332	1055.27					
Arc8	1.773	2.582	1.598	0.0506	1366.27					
Arc9	2.43	3.977	1.751	0.0768	2414.77					

В табл. 5 представлен анализ точности полученных зависимостей по результатам расчета массы раздела нагрузки 01 «Корпус».

Таблица 5

Анализ точности полученных зависимостей

Проект	Фактическая сумма масс по разделу 01 «Корпус», т	Сумма масс по зависимостям (1), (3), (4), т		Погрешность, %	
		$R_{eH} = 235$, МПа	$R_{eH} = 390$, МПа	$R_{eH} = 235$, МПа	$R_{eH} = 390$, МПа
15781	2056	2092	1898	1,7	7,7

Наливное судно проекта 15781 имеет ледовый класс Ice2 и относится к размерной группе Small. В предположении, что предел текучести материала корпусных конструкций судна этого проекта $R_{eH} = 235$, МПа, погрешность в определении массы корпуса по полученным зависимостям составила 1,7 %, что является достаточно приемлемым результатом. При определении массы корпуса для случая предела текучести материала $R_{eH} = 390$, МПа, погрешность составила 7,7 %. Несколько большее значение погрешности в этом случае объясняется меньшими расчетными толщинами элементов корпусных конструкций.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании указанных зависимостей достигается достаточная точность расчета массы раздела 01 «Корпус».

Заключение

Полученные зависимости для расчета массы раздела 01 «Корпус» в первом приближении, позволяют учесть влияние ледового класса и проектной скорости на массу корпусных конструкций и могут быть использованы в математической модели проектирования наливного судна ледового плавания при определении водоизмещения порожнем и последующей оценке стоимости постройки судна.

Литература

1. Штрек А. А. Современные тенденции и вызовы при проектировании арктических транспортных судов // Российская Арктика. 2019. № 5. С. 30-35.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2022.
3. Суслов А. Н., Линник Е. Ю. Исследование основных проектных характеристик наливных судов ледового плавания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Специальный выпуск 2. С. 134-137.
4. Платонов В. В., Тряскин В. Н. Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 84-96.
5. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2022.
6. OST5P.0206–2002 Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов. Классификация элементов нагрузки. СПб.: НИИ «Лот» ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2003. 74 с.
7. Papanikolaou A. Ship Design: Methodologies of Preliminary Design. Dordrecht: Springer, 2014. 628 с.
8. Таровик О. В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: дис. ...канд. техн. наук: 05.08.03. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2015. 186 с.
9. Ашик В. В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1985. 318 с.

References

1. Shtrek A. A. Sovremennyye tendentsii i vyzovy pri proektirovani arkticheskikh transportnykh sudov [Current trends and challenges for the designing of arctic cargo vessels]. Rossiyskaya Arktika. 2019. № 5. pp. 30-35.
2. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull]. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2022.
3. Suslov A. N., Linnik E. Yu. Issledovanie osnovnykh proektnykh kharakteristik nalivnykh sudov ledovogo plavaniya [Main design parameters of ice-going tankers]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2020. Spetsial'nyy vypusk 2. pp. 134-137.
4. Platonov V. V., Tryaskin V. N. Arkhitekturno-konstruktivnye osobennosti arkticheskikh sudov dvoynogo deystviya [Architectural and structural features of Arctic double-acting vessels]. Arktika: ekologiya i ekonomika. 2019. № 3 (35). pp. 84-96.
5. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2022.
6. OST5P.0206–2002 Nagruzka mass grazhdanskikh i vspomogatel'nykh sudov. Klassifikatsiya elementov nagruzki [Weight loads of civil and service ships. Classification of load components]. SPb.: NII «Lot» FGUP «TsNII im. akad. A. N. Krylova», 2003. 74 p.
7. Papanikolaou A. Ship Design: Methodologies of Preliminary Design. Dordrecht: Springer, 2014. 628 p.
8. Tarovik O. V. Metodika opredeleniya mass konstruksiy ledovykh usileniy transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya [Method to Estimate the Additional Weight of Ice-Strengthening Structures of Transport Vessels at the Concept Design Stage]: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.08.03. SPb.: FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr», 2015. 186 p.
9. Ashik V. V. Proektirovanie sudov [Ship design]. L.: Sudostroenie, 1985. 318 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Николаевич Суслов, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

Alexander N. Suslov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

Елена Юрьевна Линник, аспирант кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zjillz@yandex.ru

Elena Y. Linnik, graduate student of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: zjillz@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 26.05.2022.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.037>

Безопасность судна, качающегося под действием нерегулярных ветра и волн

Р.В. Борисов¹ rv2borisov@mail.ru, А.А. Лузянин¹ luzianin52@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. При динамическом воздействии ветровой нагрузки обычно рассматривается отношение предельного выдерживаемого судном кренящего момента, называемого иногда минимальным опрокидывающим моментом, к расчетному кренящему моменту от давления ветра. Это отношение называется коэффициентом запаса остойчивости или критерием погоды, а также основным критерием. Оценка динамической остойчивости судна существенно осложняется, если в критерии погоды учитывается кренящее действие не только ветровой нагрузки, но и набегающих волн. Суммарный эффект воздействия кренящих моментов на судно зависит от целого ряда факторов: от характера набегающих волн, положения судна по отношению к волнению, степени динамичности ветровой нагрузки, сдвига по фазе между кренящим моментом от давления ветра и возмущающим моментом волнения. При построении критерия погоды отмеченные факторы могут быть учтены различным образом, в разной степени и в разных комбинациях, однако всегда стараются удовлетворить очевидным условиям: выбранная комбинация воздействия ветра и волн должна быть, с одной стороны, достаточно тяжелой в отношении остойчивости, а с другой, — вполне вероятной в смысле возможности ее возникновения в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: угол крена, критерий погоды, кренящий момент, восстанавливающий момент, амплитуда бортовой качки, вероятность опрокидывания

Для цитирования: Борисов Р.В., Лузянин А.А. Безопасность судна, качающегося под действием нерегулярных ветра и волн. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 22—28.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.037>

The safety of a ship swaying under the influence of irregular winds and waves

Rudolf V. Borisov¹ rv2borisov@mail.ru, Aleksandr A. Luzyanin¹ luzianin52@mail.ru

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

Annotation. During the dynamic impact of the wind load the ratio of extremely withstand heeling moment of the ship, sometimes referred to as the minimum overturning moment, to the calculated heeling moment from wind pressure is usually considered. This ratio is called the safety factor or the stability criterion of the weather, as well as the basic criterion. The Assessment of dynamic stability of the ship is significantly complicated if the criterion of the weather takes into account not only the heeling from wind load, but from the incoming waves also. The total effect of the heeling moments on the ship depends on several factors: the nature of incoming waves, location of the ship relative to the excitement, the degree of dynamic wind load, the phase shift between heeling moment from wind pressure and excited moment of the waves. When building a criterion of weather the above-mentioned factors can be taken into account in different ways, in different degrees and in different combinations, but always trying to satisfy the obvious conditions: the selected combination of impact of wind and waves should be, on the one hand sufficiently hard for stability and on the other, — it is probable in the sense that it occurs during operation.

Key words: escort towing, tugs, static stability, dynamic water-line, towing tank

For citation: Rudolf V. Borisov, Aleksandr A. Luzyanin, The safety of a ship swaying under the influence of irregular winds and waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 22—28.

Введение

Форма представления и использования критериев погоды может быть разной. В первую очередь, она связана с конкретной механической моделью воздействия кренящих моментов на судно, которая лежит в основе рассматриваемого критерия. В расчетной схеме норм остойчивости ветровая нагрузка может считаться приложенной к судну как статически, так и динамически. В зависимости от

этого изменяется и вид критерия остойчивости, связанного с условиями погоды.

При статическом действии ветровой нагрузки обычно сопоставляются угол крена, вызываемый давлением ветра, с предельно допустимым значением угла, превышение которого грозит судну опрокидыванием. В частном случае, когда справедлива метацентрическая формула остойчивости, сопоставляются непосредственно метацентрические высоты - фактически имеющаяся

с допустимой, определяемой предельным углом крена.

При динамическом воздействии ветровой нагрузки угол крена от давления ветра обычно рассматривается отношением предельного выдерживаемого судном кренящего момента, называемого иногда минимальным опрокидывающим моментом, к расчетному кренящему моменту от давления ветра. Это отношение $K = \frac{M_{ОПР}}{M_{КР}}$ называется коэффициентом

запаса остойчивости или критерием погоды, а также основным критерием.

Если критерий погоды учитывает действие только ветровой нагрузки, то минимальный опрокидывающий момент должен определяться исходя из восстанавливающих способностей судна на тихой воде. При известных упрощениях, широко используемых в практике нормирования остойчивости, это сводится к элементарным построениям на диаграмме статической или динамической остойчивости.

Оценка динамической остойчивости судна существенно осложняется, если в критерии погоды учитывается кренящее действие не только ветровой нагрузки, но и набегающих волн. Суммарный эффект воздействия кренящих моментов на судно зависит от целого ряда факторов: от характера набегающих волн, положения судна по отношению к волнению, степени динамичности ветровой нагрузки, сдвига по фазе между кренящим моментом от давления ветра и возмущающим моментом волнения.

Морские волны редко бывают регулярными (мертвая зыбь), и, как правило, имеют нерегулярный характер (ветровые волны). Волнение может распространяться под разными курсовыми углами по отношению к направлению хода судна, и в зависимости от этого будут существенно изменяться элементы качки. Ветровая нагрузка может подействовать на судно в момент, когда оно находится в положении равновесия, когда оно имеет крен от качки навстречу ветру или в направлении скорости ветра. Характер приложения ветровой нагрузки тоже может различаться: порыв ветра может быть некоторой добавкой к стабильной составляющей воздушного потока, имеющей постоянную среднюю скорость, но он может возникнуть и после кратковременного затишья, так что скорость ветра быстро возрастет от нуля до максимального значения. В зависимости от этого будет разным не только ветровой крен судна, но и суммарный эффект кренящего действия ветра и волн.

При построении критерия погоды отмеченные факторы могут быть учтены различным образом, в разной степени и в разных комбинациях, однако всегда стараются удовлетворить очевидным условиям: выбранная комбинация воздействия ветра и волн должна быть, с одной стороны, достаточно тяжелой в отношении остойчивости, а с другой, - вполне вероятной в смысле возможности ее возникновения в процессе эксплуатации. Эти условия в известной степени противоречивы, и

обычно приходится искать компромиссное решение, ориентируясь как на физическую сторону процесса, так и на опыт эксплуатации судов, в особенности на аварийную статистику. Естественно, что в разных странах они могут оказаться различными.

Задача об определении вероятности опрокидывания судна, штормующего в определенном районе мирового океана, подразделяется на две. Первая задача заключается в определении вероятности нахождения судна в условиях ветра с заданной средней скоростью и волнения с заданной характерной высотой волн. Оно осуществляется на основании гидрометеорологических данных о частоте наблюдения тех или иных условий ветро-волнового режима в заданном морском районе. Поскольку наблюдения за ветром и волнением проводятся обычно через **каждые шесть часов**, решение первой задачи дает приближенное значение вероятности такого события: «судно, оказавшееся в заданном водном бассейне, безразлично, в какое время года и в каком районе, встретило данные условия ветра и волнения и, пребывая в море в течение **шести часов**, находится в этих условиях».

В существующих нормах ИМО остойчивость по критерию погоды K считается достаточной, если при указанном ниже условном действии ветра и волнения выполняется требование к критерию. При этом считается, что:

1. Судно находится под воздействием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к его диаметральной плоскости, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента l_{w1} (рис.1);

2. От статического угла крена θ_0 , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой l_{w1} и кривой восстанавливающих плеч $l(\theta)$, под действием волн судно кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде бортовой качки θ_1 ;

3. На накренное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента l_{w2} ;

4. Вычисляются и сравниваются площади a и b , заштрихованные на рис.1. Площадь b ограничена кривой $l(\theta)$ восстанавливающих плеч, горизонтальной прямой, соответствующей кренящему плечу $l_{w2}=1,5l_{w1}$, и углом крена $\theta_f = 50^\circ$, либо углом крена θ_c , соответствующим точке второго пересечения прямой l_{w2} с кривой восстанавливающих плеч - в зависимости от того, какой из этих углов меньше. Площадь a ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой l_{w2} и углом крена, равным $\theta_0 - \theta_1$;

5. Остойчивость судна по критерию погоды $K = b/a$ считается достаточной, если площадь b равна или больше площади a , т.е. $K \geq 1$, а угол крена от статического действия ветра θ_{w1} не превышает 16° или угла равного 0.8 угла входа в воду открытой палубы, смотря по тому, который из них меньше.

6. Характеры динамически приложенных порывов и амплитуд качки считаются детерминированными.

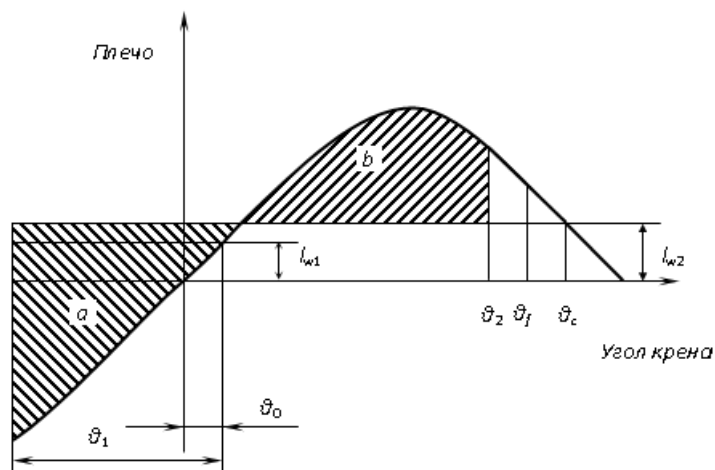


Рис. 1.

Этот критерий или удовлетворяется, или не удовлетворяется. Он не учитывает возможные особенности конкретного района плавания с конкретными ветровыми и волновыми условиями. Его трудно корректировать даже с использованием экспериментальных результатов. Поэтому определение уровня безопасности при использовании критерия затруднено.

Формирование основного критерия с учетом нерегулярности ветра и волн

В настоящей работе рассматривается совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности. При этом используются спектры фактического ветра и волн, а средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами.

Действие ветра моделируется двумя составляющими: действием средней постоянной скорости ветра и колебаниями скорости ветра (порывы). Основная идея состоит в том, что постоянно действующий ветер вызывает дрейф с постоянной скоростью, так как будет наблюдаться равенство гидродинамической силы, действующей на подводную часть судна при качке, и противоположной по направлению силы действия среднего ветра. При этом предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что у гидродинамических реакций, обусловленных качкой не хватает времени, чтобы полностью развиться, и таким образом, ими пренебрегают.

Боковой ветер дует со скоростью $w(t)$. Чтобы определить постоянный кренящий момент и момент от порывов ветра, проводится линеаризация скоростного напора воздуха.

Давление ветра p , связанное со скоростью потока $w(t)$, будет равно

$$p = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} w^2(t), \tag{1}$$

где: $\rho_{\text{возд.}}$ - плотность воздуха.

Скорость ветра $w(t)$ определяется в виде суммы средней скорости ветра \bar{w} и мгновенной скорости ветра колебания $\delta w(t)$, а именно:

$$w(t) = \bar{w} + \delta w(t). \tag{2}$$

Если пренебречь составляющими второго порядка, на основе предположения, что коэффициент изменчивости поля ветра мал,

линеаризованное выражение давления ветра получится равным:

$$p(t) = \bar{p} + \delta p(t), \tag{3}$$

где: \bar{p} - постоянное давление ветра, равное

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2; \tag{4}$$

$\delta p(t)$ - переменное давление ветра, равное

$$\delta p(t) \approx \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t). \tag{5}$$

Тогда горизонтальная сила от действия ветра будет равна

$$F_w(t) = F_{0w} + \delta F_w(t), \tag{6}$$

где: F_{0w} - постоянная боковая сила (она же средняя)

$$F_{0w} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 C_y A_{\text{п}}, \tag{7}$$

а $\delta F_w(t)$ - переменная

$$\delta F_w(t) \approx \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) C_y A_{\text{п}}. \tag{8}$$

В выражениях (7) и (8)

C_y - коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от наличия надстроек, разности надводных конструкций и их формы и т.д. Постоянный кренящий момент от ветра M_{w1} можно вычислить по формуле

$$M_{w1} = F_{0w}(H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}) = \frac{1}{2} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 A_{\text{п}}(H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}), \tag{9}$$

где $H_{\text{гд}}$ - отстояние центра гидродинамического давления от ватерлинии вниз. При статическом действии ветра он обычно принимается равным половине осадки $T/2$. При этом считается, что центр давления при равномерном распределении по высоте ветровой нагрузки совпадает с центром парусности.

Величина среднего ветрового момента предполагается независимой от мгновенного угла крена при качке.

Плечо постоянного кренящего момента будет равно

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{\Delta} = \frac{1}{2\Delta} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 A_{\text{п}}(z + H_{\text{гд}}). \tag{10}$$

Из обычного уравнения статики можно получить постоянный угол крена θ_0 , относительно которого при воздействии волн происходит качка судна

$$\Delta l(\theta) = M_{w1}, \tag{11}$$

Угол крена θ_0 удобнее получать графически, как это показано на рис.1, но можно определять аналитическим путем, предварительно проведя аппроксимацию $l(\theta)$.

Переменный кренящий момент вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta M_w(t) &\approx \delta F_w(t)(d+z-z_g) = \\ &= C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) A(d+z-z_g) \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что гидродинамические реакции не успевают развиться. Если бы использовался подход «масштаба медленного времени», плечо силы от порывистости можно было бы считать равным плечу силы для постоянного ветра, т. е. $z + H_{гд}$.

Плечо переменного кренящего момента можно определить по формуле

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2}, \quad (13)$$

где δl_{w2} – дополнительное плечо кренящего момента, возникающего именно от порывов ветра

$$\delta l_{w2}(t) = \frac{\delta M_w(t)}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) A(d+z-z_g). \quad (14)$$

Порывистость ветра, т. е. колебания скорости ветра около среднего значения \bar{w} , является нулевым средним гауссовским процессом, который можно охарактеризовать во временной/частотной области соответствующим спектром порывов $S_w(\omega)$. Он может принимать различные формы в зависимости от типа ветра, от средней скорости в географической зоне, от шероховатости местности и т.д. В компактном виде он приводится в выражении

$$S_w(\omega) = 4K^* \frac{\bar{w}^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1+X_D^2)^{\frac{5}{4}}}, \quad (15)$$

где $K^* = 0,003$ и $X_D = 600 \frac{\omega}{\pi \bar{w}}$ – параметры спектра.

В соответствии с процедурой линеаризации давления, описанной выше, спектр момента линеаризованных колебаний от ветра может быть получен в форме:

$$S_{\delta M_w}(\omega) = [C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w A(d+z-z_g)]^2 S_w(\omega). \quad (16)$$

При этом не принимаются во внимание эффект некоторой пространственной неравномерности поля скоростей ветра и эффект неустойчивости процесса.

Учитывая (14), спектральную плотность для плеча переменного ветрового момента можно записать в виде:

$$S_{\delta l_{w2}}(\omega) = [\rho_{\text{в}} \bar{v}_B C_y A_{\Pi} (d+z-z_g)]^2 \frac{S_w(\omega)}{\Delta^2}. \quad (17)$$

С помощью $S_{l_{w2}}(\omega)$ может быть получена дисперсия

$$D_{\delta l_{w2}} = \int_0^{+\infty} S_{\delta l_{w2}}(\omega) d\omega. \quad (18)$$

Зная дисперсию, можно с заданной обеспеченностью $a_{l_{w2}}$ получить плечо δl_{w2}

$$\delta l_{w2} = a_{l_{w2}} \sqrt{D_{\delta l_{w2}}}. \quad (19)$$

Бортовая качка корабля при действии волн в общем случае моделируется нелинейным уравнением

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44}(\dot{\theta}) + \Delta l(\theta) = M_B(t), \quad (20)$$

где J_x - момент инерции массы судна;

λ_{44} - момент инерции присоединенных масс;

$v_{44}(\dot{\theta})$ - нелинейный коэффициент демпфирования;

$M_B(t)$ – возмущающий момент от волн.

Если колебания судна при качке происходят около нулевого начального угла, диаграмму статической остойчивости линеаризуют, представив диаграмму в следующем виде:

$$l(\theta) = \frac{dl(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=0} \theta = h_0 \theta. \quad (21)$$

В окрестности θ_0 диаграмму статической остойчивости можно линеаризовать аналогичным образом

$$l(\theta) = \frac{dl(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} \vartheta, \quad (22)$$

где: h_{θ_0} – обобщенная метацентрическая высота при угле θ_0 ;

$$\vartheta = (\theta - \theta_0) \quad (23)$$

относительный угол крена.

В общем случае демпфирование имеет нелинейный характер

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44} \dot{\theta} + w_{44} \dot{\theta} |\dot{\theta}| + \dots,$$

но обычно для него применяют линеаризацию поэтому в уравнение качки можно подставить $v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44} \dot{\theta}$. В окрестности θ_0 будет иметь место следующее выражение

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44\theta_0} \dot{\vartheta}. \quad (24)$$

С учетом (22), (23) и (24) линеаризованное уравнение качки под действием волн в относительных координатах можно записать в виде:

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\vartheta} + v_{44\theta_0} \dot{\vartheta} + \Delta h_{\theta_0} \vartheta = M_B(t). \quad (25)$$

Для решения уравнения (20) разделим все его члены на первый коэффициент. Тогда получим

$$\ddot{\vartheta} + 2\nu_{\theta_0} \dot{\vartheta} + n_{\theta_0}^2 \vartheta = n_{\theta_0}^2 m_B(t). \quad (26)$$

Здесь

$$2\nu_{\theta_0} = \frac{v_{44\theta_0}}{(J_x + \lambda_{44})} \quad (27)$$

коэффициент затухания в окрестности $\theta = \theta_0$;

$$n_{\theta} = \sqrt{\frac{\Delta h_0}{(J_x + \lambda_{44})}} \quad (28)$$

частота бортовой качки в окрестности $\theta = 0$;

$$n_{\theta_0} = \sqrt{\frac{\Delta h_{\theta_0}}{(J_x + \lambda_{44})}} \quad (29)$$

частота бортовой качки в окрестности $\theta = \theta_0$; связь между этими частотами определяется соотношением

$$\frac{n_{\theta_0}}{n_{\theta}} = \sqrt{\frac{h_{\theta_0}}{h_0}}. \quad (30)$$

Безразмерный возмущающий момент от волн.

$$m_B(t) = \frac{M_B(t)}{\Delta h_0} \quad (31)$$

С учетом (30) уравнение (26) можно переписать в виде:

$$\ddot{\vartheta} + 2\nu_{\theta_0} \dot{\vartheta} + n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_0} \vartheta = n_{\theta_0}^2 m_B(t). \quad (32)$$

Для описания нерегулярного волнения, используется спектральный подход, основанный на допущениях линейной гидродинамической теории. Возмущающий момент от воздействия волн должен быть гауссовым процессом, спектр которого $S_{M_B}(\omega)$ можно оценить по спектру углов волнового склона $S_{\alpha}(\omega)$:

$$S_{M_B}(\omega) = [\Delta h_0 \kappa_{\theta}(\omega)]^2 S_{\alpha}(\omega). \quad (33)$$

Здесь $\kappa_{\theta}(\omega)$ - коэффициент, учитывающий конечность размеров судна. Он рассчитывается для каждого конкретного судна по соответствующим формулам, полученным в теории качки.

Спектр углов волнового склона $S_{\alpha}(\omega)$ может быть определен по формуле

$$S_{\alpha}(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S_r(\omega), \quad (34)$$

где $S_r(\omega)$ - спектр морского волнения.

Спектр безразмерного возмущающего момента от волн можно записать в виде:

$$S_{m_B}(\omega) = \frac{S_{M_B}(\omega)}{(\Delta h_0)^2} = [\kappa_{\theta}(\omega)]^2 \frac{\omega^4}{g^2} S_r(\omega). \quad (35)$$

В общем случае для определения спектра $S_{\vartheta}(\omega)$ волнового процесса ϑ может быть использовано линейное уравнение (32). Тогда

$$S_{\vartheta}(\omega) = \frac{n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta_0}\omega]^2}, \quad (36)$$

С помощью спектра $S_{\vartheta}(\omega)$ может быть получена дисперсия:

$$D_{\vartheta} = \int_0^{+\infty} S_{\vartheta}(\omega) d\omega. \quad (37)$$

Подставив в (37) выражение (30) и (35), получим для дисперсии амплитуд качки от волнения:

$$D_{\vartheta} = \int_0^{+\infty} \frac{n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 \frac{h_{\vartheta_0}}{h_0} - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (38)$$

Дисперсия угловых скоростей получается по формуле

$$D_{\dot{\vartheta}} = \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2 n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 \frac{h_{\vartheta_0}}{h_0} - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (39)$$

В целях упрощения с достаточной для практики точностью можно приравнять h_{ϑ_0} и h_0 , $2\nu_{\vartheta_0}$ и $2\nu_{\vartheta}$. Тогда выражения (36), (38) и (39) запишутся в виде:

$$S_{\vartheta}(\omega) = \frac{n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta}\omega]^2}, \quad (40)$$

$$D_{\vartheta} = \int_0^{+\infty} \frac{n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta}\omega]^2} d\omega; \quad (41)$$

$$D_{\dot{\vartheta}} = \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2 n_{\vartheta}^4 S_{m_{\vartheta}}(\omega)}{[n_{\vartheta}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\vartheta}\omega]^2} d\omega. \quad (42)$$

Амплитуда качки при воздействии нерегулярного волнения можно определять в зависимости от заданной обеспеченности a_{ϑ} по формуле:

$$\vartheta_1 = a_{\vartheta} \sqrt{D_{\vartheta}} \quad (43)$$

Средняя амплитуда качки определяется при 46,5% обеспеченности

$$\vartheta_{\text{ср.}} = \sqrt{D_{\vartheta}} \quad (44)$$

Максимальная амплитуда качки определяется при 0,5% обеспеченности

$$\vartheta_{\text{max}} = 3,25 \sqrt{D_{\vartheta}} \quad (45)$$

Конкретные условия плавания будут учитываться через значения l_{w1} (т.е. θ_0), l_{w2} с заданной обеспеченностью и амплитуду качки ϑ_1 с заданной обеспеченностью. Выбор величин $a_{l_{w2}}$ и a_{ϑ} влияет на жесткость требований по обеспечению неопрокидывания и требует проведения дополнительных исследований и согласований. Соответствующие расчеты будут проведены при выполнении работ по второму этапу темы.

Оценка риска опрокидывания судна, стоящего лагом к ветру и волнам

В большинстве случаев даже при неизменном состоянии нагрузки в каждый момент времени опрокидывание может наступить, а может и не наступить, в зависимости от случайных изменений условий плавания в пределах данного комплекса, например, в зависимости от случайного порыва ветра, сочетавшегося во времени с некоторым случайным углом крена и угловой скоростью бортовой качки и некоторыми другими неблагоприятными характеристиками, в частности волнения, в данный момент. При этом в любой бесконечно малый промежуток времени dt будет существовать бесконечно малая вероятность наступления таких условий, при которых судно опрокидывается

$$dP_{\text{опр.}} = \lambda(t) dt. \quad (46)$$

Функция $\lambda(t)$, очевидно, зависит от нагрузки судна, формы его корпуса и архитектуры, а также от характеристик ветра и волнения и т. п. Она может

меняться во времени периодически (например, на правильном волнении) или непериодически (на неправильном волнении). Функция $\lambda(t)$ неотрицательна и интегрируема на любом конечном интервале времени.

Пользуясь тождеством $a = e^{\ln a}$, запишем вероятность неопрокидывания в тот же интервал времени dt как

$$P_{dt} = 1 - \lambda(t) dt = e^{\ln[1 - \lambda(t) dt]}.$$

Так как с точностью до малых высших порядков

$$\ln[1 - \lambda(t) dt] = -\lambda(t) dt,$$

то вероятность неопрокидывания за интервал времени dt будет равна

$$P_{dt} = e^{-\lambda(t) dt}. \quad (47)$$

Поскольку мы требуем, чтобы опрокидывания не было за все время эксплуатации в неблагоприятных ветро-волновых условиях, которое можно назвать временем экспозиции $T_{\text{эксп.}}$ т. е. за всю бесконечную последовательность бесконечно малых интервалов времени dt , то по теореме умножения вероятностей

$$P = \prod_{i=1}^{\infty} P_{dt_i}, \quad (48)$$

или, учитывая (45),

$$P = e^{-\int_0^{T_{\text{эксп.}}} \lambda(t) dt}. \quad (49)$$

В частном случае, если $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, $P = e^{-\lambda T_{\text{эксп.}}}$, вероятность опрокидывания будет равна

$$P_{\text{опр.}} = 1 - P = 1 - e^{-\lambda T_{\text{эксп.}}}. \quad (50)$$

Для процесса опрокидывания важно соотношение $\frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\text{ср.}}}$, где $T_{\text{ср.}}$ - характерный параметр - «среднее время опрокидывания».

Тогда получается $\lambda = \frac{1}{T_{\text{ср.}}}$ и вероятность опрокидывания за время $T_{\text{эксп.}}$

$$P_{\text{опр.}} = 1 - e^{-\frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\text{ср.}}}}, \quad (51)$$

Чтобы использовать формулу (51), необходимо выполнить оценку времени $T_{\text{ср.}}$. Оно может быть получено как время, обратное частоте наступления предельного угла $\theta_{\text{пред.}}$. Такая частота может быть определена для гауссовского процесса при использовании следующего выражения:

$$\frac{1}{T_{\text{ср.}}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{D_{\vartheta}}}{\sqrt{D_{\vartheta}}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta_{\text{пред.}} - \theta_0}{a \sqrt{D_{\vartheta}}} \right)^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{D_{\vartheta}}}{\sqrt{D_{\vartheta}}} e^{-\frac{1}{2} K^2}. \quad (52)$$

Объединяя (51) и (52), получим вероятность опрокидывания

$$P_{\text{опр.}} = 1 - e^{-\frac{T_{\text{эксп.}} \sqrt{D_{\vartheta}}}{2\pi} e^{\frac{1}{2} K^2}}. \quad (53)$$

Период бортовой качки определяется по формуле:

$$T_{\vartheta} = \frac{2\pi \sqrt{D_{\vartheta}}}{\sqrt{D_{\vartheta}}}. \quad (54)$$

Поскольку на нерегулярном волнении судно, в основном, качается с собственным периодом T_{ϑ} (период качки на тихой воде), с достаточной степенью точности можно вместо (54) сразу использовать этот период.

Тогда выражение для вероятности опрокидывания будет иметь вид:

$$P_{\text{опр.}} = 1 - e^{-\frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\vartheta}} e^{\frac{1}{2} K^2}}. \quad (55)$$

Выражение (55) дает приблизительную оценку вероятности опрокидывания с учетом статического и динамического воздействия. Статическое воздействие, учитывается в остаточном запасе $\theta_{\text{ост.}} = \theta_{\text{пред.}} - \theta_0$, динамическое учитывается через амплитуды качки заданной обеспеченности $a \sqrt{D_{\vartheta}}$.

Формула (47) позволяет сделать некоторые предварительные оценки:

- чем больше K , тем ниже вероятность опрокидывания (это вполне логично);
- с другой стороны, чем больше $\frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\theta}}$, тем выше вероятность опрокидывания. При бесконечном времени эксплуатации вероятность опрокидывания равна 1.

Отношение $\frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\theta}}$ называется коэффициентом выдержки

$$\bar{T}_{\text{эксп.}} = \frac{T_{\text{эксп.}}}{T_{\theta}} \quad (56)$$

С учетом (56) формулу (55) для вероятности опрокидывания можно записать в виде:

$$P_{\text{опр.}} = 1 - e^{-\bar{T}_{\text{эксп.}} e^{-\frac{1}{2}K^2}} \quad (57)$$

Из (57) может быть вычислено минимально допустимое значение критерия K

$$K = \left\{ -2 \ln \left[-\frac{\ln P_{\text{опр.}}}{\bar{T}_{\text{эксп.}}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (58)$$

Риск опрокидывания $R_{\text{опр.}}$ можно оценить через величину, обратную критерию остойчивости K :

$$R_{\text{опр.}} = \frac{1}{K} = \left\{ -2 \ln \left[-\frac{\ln P_{\text{опр.}}}{\bar{T}_{\text{эксп.}}} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \leq 1 \quad (59)$$

Если использовать стандартный коэффициент выдержки $\bar{T}_{\text{эксп.}} = 1 \cdot 10^8$ и приемлемую вероятность опрокидывания $P_{\text{опр.}} = 1 \cdot 10^{-6}$, получим при обеспеченности амплитуд качки 46,5% ($\alpha = 1$) минимально допустимое значение $K = 5,29$ и $R_{\text{опр.}} = 0,189$.

Для случая плавания судна смешанного плавания в условиях 6-часового прогноза погоды $T_{\text{эксп.}} =$

21600 секунд, T_{θ} может составлять в зависимости от размеров судна 3-8 секунд. Возьмем $T_{\theta} = 6$ сек и также вероятность опрокидывания $P_{\text{опр.}} = 1 \cdot 10^{-6}$. Тогда получим $K = 3,3355$ и $R_{\text{опр.}} = 0,300$.

Для других параметров $\bar{T}_{\text{эксп.}}$, $P_{\text{опр.}}$ и α оценки риска опрокидывания могут быть другими. Варьирование их позволит либо ослабить требования к судам, либо ужесточить в зависимости от возраста судна, его состояния, региона плавания, прогноза погоды, пожеланий перевозчика, требований страховых компаний и наблюдающих органов и т.д. Эти параметры должны выбираться на основе соглашений.

Необходимо проводить массовые расчеты для того, чтобы выработать допустимые критерии оценки риска опрокидывания судна при движении в условиях порывистого ветра и нерегулярного волнения.

Заключение

Следует отметить, что выражения (58) и (59) учитывают опрокидывание только с подветренной стороны. Предполагается, что опрокидывание на наветренную сторону будет происходить с пренебрежимо малой вероятностью. Такое приближение разумно, если статический угол крена достаточно велик, однако, чем меньше статический угол крена от постоянно действующего ветра, тем больше вероятность опрокидывания на наветренную сторону. В идеальном случае при нулевом среднем угле крена, вероятности опрокидывания на подветренную и наветренную стороны будут равными.

Литература

1. Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов. Ленинград. «Судостроение», 1971.
2. Благовещенский С.Н. Национальные требования к остойчивости неповрежденных судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
3. Севастьянов Н.Б. Основные вопросы нормирования остойчивости промысловых судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
4. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
5. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
6. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.
7. Справочник по теории корабля (Под ред. Я.И. Войткунского). Т.2. Л.: Судостроение. 1985.
8. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л., "Судостроение", 1982.

References

1. Lugovskij V.V. Teoretitseskie osnovy normirovanij ostoystivosti morskih sudov. Leningrad. «Sudostroenie», 1971.
2. Blagovesthenskij S.N. Nacionalnye trebovanij k ostoystivosti nepovrezdennyih sudov. – V sb.: Teoretitseskie i praktitseskie voprosiy ostoystivosti i nepotoplayemosti. M.–L., «Transport», 1965 (Registr SSSR).
3. Sevastaynov N.B. Osnovnye voprosiy normirovanij ostoystivosti promyslovyh sudov – V sb.: Teoretitseskie i praktitseskie voprosiy ostoystivosti i nepotoplayemosti. M.–L., «Transport», 1965 (Registr SSSR).
4. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
5. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
6. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.

7. Spravochnik po teorii korablya [Handbook of ship theory] (Pod red. YA.I. Voitkunskogo). T.2. L.: «Sudostroenie». 1985.
8. Borodai I.K., Necvetaev Y.A. Morehodnost sydov. [Seaworthiness of ships.] L.: «Sudostroenie». 1982

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рудольф Васильевич Борисов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: rv2borisov@mail.ru

Rudolf V. Borisov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: rv2borisov@mail.ru

Александр Альфредович Лузянин, кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: luzianin52@mail.ru

Aleksandr A. Luzyanin, Ph.D. (Eng), assistant professor of department of theory of the ship, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: luzianin52@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.03.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.03.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 03.04.2022.

Научная статья

УДК 626.01; 627.22

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.038>

Изменчивость физико-механических свойств моделированного льда гранулированного типа в ходе эксперимента

А.А. Добродеев^{1,2,3} stamukha@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ³Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Определение физико-механических свойств моделированного льда является одним из важнейших этапов экспериментальных исследований в ледовом бассейне, предназначенном для изучения ходкости и управляемости судов во льдах, а также ледовых нагрузок на морские инженерные и гидротехнические сооружения. Подходы к выполнению таких измерений в ледовых бассейнах всего мира стандартизированы и соответствуют рекомендациям Международного Комитета Опытных Бассейнов. Определённой особенностью экспериментальных исследований данного типа является то, что достаточно сложно с высокой точностью добиться требуемых значений толщины или прочности моделированного льда. В связи с этим разработаны и применяются методики корректировки результатов модельных испытаний. Но при этом остается открытым вопрос выбора времени для измерений свойств льда и частоты их выполнения, т.к. влияние длительности эксперимента на изменчивость физико-механических свойств льда изучено слабо. Данная проблема обусловлена еще и тем, что продолжительность модельных испытаний в современных ледовых бассейнах, отличающихся увеличенными размерами ледового поля, варьируется в зависимости от количества пробегов и уровня сложности исследований. В ледовом бассейне Крыловского Центра выполнены необходимые для изучения данного вопроса измерения в ровном льду, смоделированном по технологии FG, и сделаны выводы о влиянии температуры воздуха на основные характеристики ледяного покрова гранулированного типа. Полученные результаты направлены на снижение неопределённости результатов модельных испытаний в ледовом бассейне.

Ключевые слова: ледовая ходкость, ледовая нагрузка на морские сооружения, физическое моделирование, ледовый бассейн, моделированный лед, прочность льда, модуль Юнга.

Финансирование: Работа выполнена как часть проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования» №0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Добродеев А.А. Изменчивость физико-механических свойств моделированного льда гранулированного типа в ходе эксперимента, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 29—36.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.038>

Variations in physical and mechanical properties of model fine-grained ice during experiment

Aleksei A. Dobrodeev^{1,2,3} stamukha@yandex.ru

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ² St. Petersburg state marine technical University, ³Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Evaluation of physical & mechanical properties of model ice is one of the most important aspects of experimental studies in ice basins designed to investigate ship propulsion and maneuverability in ice-covered waters as well as ice loads on engineering and hydraulic structures. These measurements in ice basins follow standard procedures across the world and comply with recommendations of the ITTC Committee. A certain specific feature of these types of experimental studies is that it is quite difficult to achieve the target thickness or strength values of model ice with a high accuracy. In this connection methods for correction of model test data have been developed and implemented. However, the time and frequency of measuring the ice properties remain an open question because the influence of experiment duration on variable physical & mechanical properties has been studied poorly. This problem is also caused by the fact that the test duration in modern ice basins capable of generating larger ice sheets varies depending on the number of test runs and particulars of studies. For investigation of this issue the Ice Basin of Krylov State Research Centre has conducted measurements in level ice modeled using FG ice technology and some conclusions have been drawn regarding the impact of air temperature on the main characteristics of FG ice type. The obtained results are aimed at reducing the uncertainty of model test results gathered in the ice basin.

Key words: ice performance, global ice load, physical modeling, ice basin, model ice, ice strength, Young modulus.

Financial Support: This work was carried out as part of project “Research of statistical properties relating to the ice loads on engineering structures and development of a new method of their probabilistic modeling” №0784-2020-0021 supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Aleksei A. Dobrodeev Variations in physical and mechanical properties of model fine-grained ice during experiment, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 29—36.

Введение

На сегодняшний день трудно переоценить роль модельного эксперимента в проектировании морских объектов, предназначенных для эксплуатации в сложных арктических условиях. Ключевым этапом его развития стало создание в 1955 г. первого в мире ледового опытового бассейна в АНИИ, Санкт-Петербург [1]. Опыт его работы оказался настолько удачным, что подобные бассейны стали создаваться и в других странах, заинтересованных в развитии мореплавания во льдах [2]. На сегодняшний день в этих специализированных лабораториях преимущественно выполняются исследования двух типов. К первому типу относится изучение ледовой ходкости и управляемости современных ледоколов и транспортных судов в условиях самостоятельной навигации [8] и при движении в караване [3,4], а также различных ледокольных судов и буксиров. Для второго типа исследований характерно моделирование воздействия льда на гидротехнические сооружения [5,6], опорные основания добычных платформ, мостовые переходы.

Моделирование с целью определения ледовых нагрузок на морской объект требует внимательного подхода к воспроизведению физико-механических свойств ледяного покрова, картины его разрушения при взаимодействии с сооружениями различной геометрической формы, размеров образующихся обломков льда и обтекания ими исследуемого объекта, сил трения между обломками льда и между льдом и поверхностью сооружения. Для решения задачи корректного моделирования ледовых нагрузок мировые ледовые бассейны используют различные подходы. Как правило, существует два типа искусственного льда для опытовых бассейнов: столбчатый и гранулированный. В первом случае на поверхности воды формируются ядра кристаллизации, инициирующие рост ледяного покрова также, как и в естественных условиях – сверху вниз. При применении второй технологии лед образуется вследствие распыления воды в атмосфере бассейна, предварительно охлажденной до температуры не ниже -25°C . При распылении воды температура в бассейне повышается примерно до -18°C . Требуемая толщина ледяного покрова достигается заданием нужного количества циклов намораживания. Для придания льду заданных свойств используется специальный температурный режим, включающий фазы сохранения, упрочнения и термообработки. Исследования показывают, что каждый из этих типов моделированного льда имеет свои определённые особенности [7].

В ледовом бассейне Крыловского Центра (рис. 1) для проведения модельных испытаний возможно использование столбчатого льда, но преимущественно используется технология приготовления гранулированного (fine-grained) льда [8]. Размеры чаши бассейна, где происходит намораживание льда, в плане составляют $80\text{ м} \times 10\text{ м}$ [9]. При проведении модельных испытаний судов и морских сооружений в столь большом по площади ледовом опытовом бассейне возникает вопрос

постоянства задаваемых физико-механических свойств моделируемого льда на протяжении всего эксперимента. С одной стороны, в опытовом бассейне есть возможность получения большего объема экспериментальных данных за день исследований, а, с другой стороны, вместе с ним растёт и время проведения модельных испытаний, которое в среднем составляет от двух до шести часов применительно к условиям сплошного ровного льда. В течение этого времени физико-механические свойства моделируемого льда не должны существенно изменяться, чтобы избежать дополнительной погрешности в результатах эксперимента.



Рис. 1. Проведение модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского Центра во льду, изготовленном по технологии FG

Целью настоящей работы является изучение изменчивости основных физико-механических свойств моделируемого льда типа FG в ходе модельных испытаний морских сооружений. Исследования проведены для моделируемого ровного ледяного покрова при постоянной температуре воздуха в ледовой камере, равной -6°C , а также после ее понижения до -12°C на 1 час. Полученные результаты позволяют создать предпосылки для уточнения методики проведения экспериментальных исследований в ледовом бассейне и снижения неопределённости результатов исследований.

1. Предмет и методики исследований

Искусственный лед, используемый в ледовых бассейнах для испытания моделей судов и морских инженерных сооружений, создается на основе концепции, что разрушение преимущественно ровного ледяного покрова происходит тем же образом, что и при взаимодействии реального сооружения схожей геометрии с натурным льдом. К примеру, разрушение ледяного покрова судами и корпусами платформ в форме пирамид и конусов преимущественно происходит от изгибных напряжений. Контакт широкого прямого сооружения со льдом может приводить к возникновению эффекта потери устойчивости ледового поля, расслаиванию и дроблению льда [5].

Для проверки адекватности модели льда натурному ледяному покрову используются

стандартные, предложенные на секции ледовых проблем МАГИ (Международная ассоциация гидравлических исследований), методы измерений его физико-механических свойств [10], к которым относятся:

– определение прочности льда на изгиб путем разрушения консольных балок (рис. 2а). Консоль

вырезается непосредственно в ледяном покрове и остается скрепленной с ним одним из своих концов. Нагрузка на свободный конец консоли осуществляется сверху вниз. Размеры консольных балок выбираются в зависимости от толщины льда (рис. 2б), в соответствии с рекомендациями IAHR.



а) Измерение прочности льда при изгибе



б) Измерение толщины льда



в) Измерение модуля Юнга



г) Измерение прочности льда при сжатии

Рис. 2. Измерение физико-механических свойств моделированного льда

Размер консольных балок в среднем составляет 1:3:7 (толщина льда h_l , ширина балки b , длина балки l). Расчет прочности льда на изгиб осуществляется по рекомендованной ИТТС формуле [4]:

$$\sigma_f = \frac{6Fl}{bh_l^2}, \quad (1)$$

где F – измеренное усилие, Н. Необходимо отметить, что формула (1) получена на основе технической теории изгиба балок. В ней не учитывается наличие упругого основания, а также прогибы и повороты корневого сечения. При испытаниях консольных балок моделированного льда эти эффекты с большой долей вероятности присутствуют. Специальные исследования показали, что их вклад относительно мал [11].

– определение модуля Юнга (рис. 2в). Он характеризует упругие характеристики льда и определяется путем замера прогиба "бесконечного" ледяного поля на упругом основании под действием точечной нагрузки. По полученным данным с помощью формулы рассчитываются значения модуля упругости:

$$E = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{wh_l^2} \left(\frac{F}{\delta} \right)^2 \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона; w – коэффициент упругого основания; δ – прогиб ледового поля, м.

– определение прочности льда на смятие путем протаскивания во льду цилиндрического индентора (рис. 2г). Прочность моделированного льда на смятие оценивается косвенным образом по измерениям средней силы сопротивления льда при перемещении в нем вертикально закрепленного цилиндрического индентора со скоростью 10 мм/с, соответствующей режиму хрупкого разрушения льда. Прочность льда на сжатие σ_c определяется по следующей формуле:

$$\sigma_c = \frac{F}{c_i m D k h_l} \quad (3)$$

где c_i – коэффициент, зависящий от D/h_l , m – коэффициент формы, равный 0,9 для индентора с круглым сечением; D – диаметр индентора, равный 0,03 м в выполненной работе; k – коэффициент взаимодействия, учитывающий площадь контакта льда и индентора, от 0,4 до 0,7.

Измеряемые свойства и характеристики моделированного льда связываются с величиной масштаба согласно теории подобия.

2. Программа экспериментальных исследований

Для проведения исследований изменчивости физико-механических свойств моделированного льда типа FG при его изготовлении были заданы следующие характеристики ледового поля:

- толщина льда составляет 50 мм;
- прочность льда на изгиб составляет 30 кПа.

Необходимо отметить, что на стадии создания искусственного льда типа FG требования предъявляются лишь к этим двум параметрам, т.к. другие его характеристики, такие как прочность на сжатие и модуль Юнга, могут лишь контролироваться по ходу эксперимента. Это обусловлено тем, что законы их изменения в моделированном льду опытового бассейна изучены недостаточно.

Процесс создания искусственного льда включает в себя 5 этапов, на каждом из которых меняются температурные режимы в ледовой камере. Этап I заключается в подготовке всех инженерных систем опытового бассейна к приготовлению льда и понижению температуры воздуха и воды до требуемых значений. На этапе II происходит разбрызгивание соленой воды в охлажденной атмосфере бассейна, которая превращается в гранулы будущего льда. При этом незначительно повышается температура воздуха. Для разбрызгивания воды используется специальная технологическая тележка, количество пробегов которой над площадью бассейна выбирается исходя из требуемой толщины ледяного покрова. Сразу после окончания напыления гранул образуется слой моделированного льда, которому необходимо придать требуемые физико-механические свойства. Для этого используется специальный температурный режим, включающий фазы сохранения (этап III), упрочнения и термообработки (этап IV). Этап V свидетельствует об окончании процесса создания льда и начале эксперимента в ледовом бассейне.

Программа исследований физико-механических свойств включила в себя 4 блока измерений прочности льда на изгиб и сжатие, а также модуля упругости ледового поля. Границы временных промежутков выполненных измерений обозначены латинскими буквами А – D:

- блок измерений А находился в диапазоне от 0 до 1 часа;
- блок измерений В – от 2 до 3 часов;
- блок измерений С – от 5 до 6 часов
- заключительный блок измерений D – от 9 до 10 часов.

Измерения А, В и С выполнены при постоянной температуре воздуха, составляющей минус 6⁰С. Такая же температура воздуха устанавливается в ледовом бассейне на время проведения стандартных модельных испытаний морских сооружений. Перед началом блока измерений D температура в ледовой камере была опущена до минус 12⁰С на 1 час. Такой подход часто применяется при проведении экспериментов в условиях торосов. После изготовления модели ледяного образования, температура в ледовой камере понижается на определенное время для образования консолидированного слоя, т.е. смерзания ледяного поля с расположенными под ним обломками

разрушенного льда. При этом в дополнение к образованию консолидированного слоя изменяются характеристики ровного льда, расположенного по обе стороны от моделируемого тороса. Таким образом, исследования физико-механических свойств моделированного льда после дополнительной термообработки, выполненные на этапе VII, также имеют практический интерес.

Основным допущением в выводах, полученных на данном этапе исследований прочностных параметров моделированного ледяного покрова типа FG, является проведение эксперимента без варьирования толщины льда.

3. Результаты исследований и их обсуждение

3.1. Прочность льда при изгибе

Для измерения прочности льда на изгиб на каждом этапе исследований были подготовлены и разрушены 6 консольных балок. Измерялась сила, вызвавшая разрушение балки, а также геометрические размеры образовавшегося обломка. В качестве разрушающей силы в соответствии с требованиями МКОБ и МАГИ взято максимальное (пиковое) значение измеренной силы. Для расчета прочности на изгиб была использована формула (1) для консольной балки, которая получена для упругих тел.

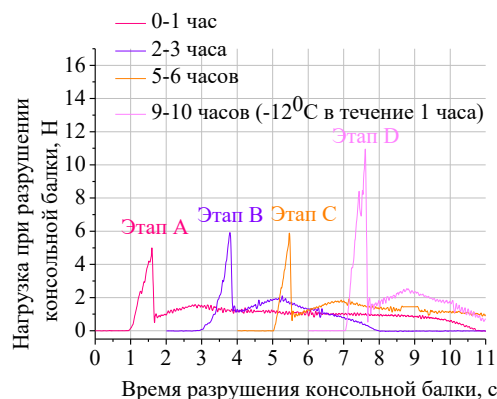


Рис. 3. Временные реализации нагружения 4 консольных балок при измерении прочности льда на изгиб через определённые промежутки времени после начала эксперимента

На рисунке 3 продемонстрированы фрагменты временных реализаций нагружения консольной балки применительно к каждому из блоков выполненных измерений А–D. Анализ данных показывает, что во всех случаях присутствует две стадии разрушения, в которых характер поведения консольной балки различается. В работе [13] этому явлению дано следующее объяснение: первая стадия соответствует упругой деформации балки, а на второй – она демонстрирует типичное неупругое поведение. Выводы о нелинейном характере разрушения балки также даны и в работе [11], однако авторы сходятся во мнении, что существующая модель гранулированного льда хорошо подходит для моделирования разрушения натурального ледяного покрова при взаимодействии с различными морскими сооружениями.

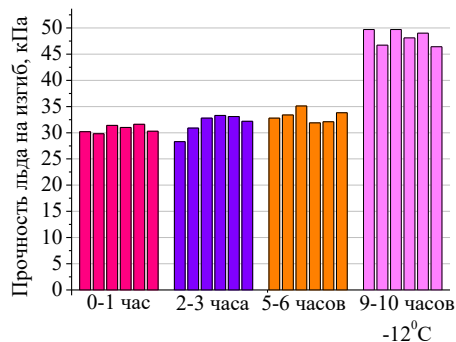


Рис. 4. Распределение значений прочности моделированного льда на изгиб через определённые промежутки времени после начала эксперимента

Касательно влияния температуры на прочность льда при изгибе можно сделать вывод, что при поддержании температуры -6°C в течение рассмотренных 6 часов имеется незначительный тренд к возрастанию прочности на изгиб, которым в большинстве случаев можно пренебречь (рис. 4). Дополнительная подморозка ледового поля на этапе VI по результатам блока измерений D привела к заметному росту прочности льда при изгибе на 20%.

3.2. Модуль Юнга

Вопросу изучения модуля Юнга моделированного льда гранулированного типа не посвящено ни одной работы. При этом прочность моделированного ледового поля зависит именно от упругих свойств льда. В ходе проведения экспериментов в ледовом бассейне лишь стремятся получить модуль Юнга натурального льда E и предельные нормальные напряжения σ_f , соответствующие изгибному разрушению как $E/\sigma_f \geq 1500$, что является доказательством адекватности модели натуре.

В работе [13] отмечено влияние случайного характера распределения модуля Юнга моделированного льда на характер разрушения полубесконечной балки, лежащей на упругом основании, при контакте с сооружением, имеющим наклонную грань. Одной из гипотез, объясняющих различие регистрируемых механических характеристик в различных частях приготавливаемого в одинаковых условиях поля моделированного льда, принято формирование стоячих волн, которые вызывают случайные осцилляции прочности [14]. Результатом исследования является то, что неоднородности в упругих свойствах льда приводят к существенному изменению характера разрушения льда при взаимодействии с наклонным сооружением.

Таким образом, исследования закономерностей изменения модуля Юнга моделированного льда является важной задачей в обосновании характера разрушения ледяного покрова, размеров обломков льда и ледовой нагрузки на исследуемые морские сооружения.

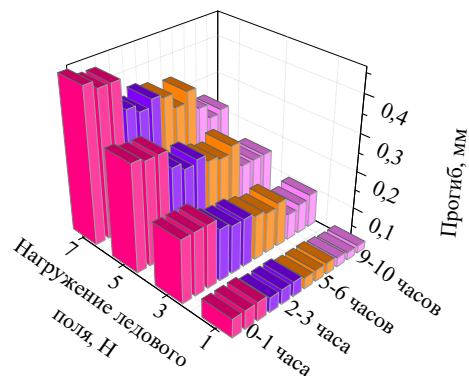


Рис. 5. Результаты измерения прогиба ледового поля через определённые промежутки времени после начала эксперимента

Каждый блок измерений модуля Юнга в данной работе включал в себя три подхода. В каждом из них ледовое поле нагружалось весом 1Н, 3Н, 5Н и 7Н, при этом регистрировался его прогиб. Результаты всех выполненных измерений прогиба ледового поля показаны на рисунке 5 в виде трехмерной гистограммы. Установлено, что с увеличением продолжительности эксперимента наблюдается очевидное уменьшение упругого прогиба ледового поля.

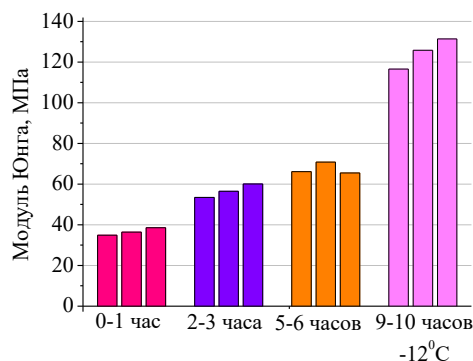


Рис. 6. Распределение значений модуля Юнга моделированного льда через определённые промежутки времени после начала эксперимента

В результате выполненных по формуле (2) расчетов модуля Юнга получено, что в течение эксперимента при постоянной температуре воздуха в ледовой камере модуль Юнга имеет очевидную тенденцию к росту (рис. 6). В течение каждого часа прирост значения модуля упругости составляет примерно 5%. Понижение температуры в ледовой камере до -12°C на 1 час привело к двукратному увеличению этой характеристики ледового поля. Таким образом, становится крайне важным изучение поведения упругих свойств моделированного льда и проведение соответствующих систематических исследований.

3.3. Прочность льда при сжатии.

Прочность льда при сжатии является основной характеристикой, определяющей величину ледовой нагрузки на сооружения с вертикальным профилем. При их взаимодействии происходит разрушение льда путем дробления, по причине горизонтального сжатия. Значения прочности льда на одноосное сжатие в натуральных условиях сильно варьируются и зависят от структуры льда, размера испытываемого образца, объема рассола, техники проведения испытания и методики обработки полученных данных. В практике модельных испытаний согласно рекомендациям МКОБ расчет прочности льда на сжатие выполняется на основании результатов инденторных тестов. Определённым преимуществом данного способа является точность измерений за счет плотного контакта льда и индентора, а также возможность повторить подобные исследования в натуральных условиях.

Изучению характера разрушения моделированного льда при внедрении в него цилиндрического индентора посвящена работа [15], в которой показано, что процесс взаимодействия может быть описан авторегрессионной моделью применительно к малым скоростям движения, характерным для хрупкого разрушения льда.

При выполнении измерений прочности льда на сжатие в ледовом бассейне был использован индентор диаметром 30 мм. Он буксировался с помощью технологической тележки ледового бассейна на скорости 10 мм/с. На каждом этапе было выполнено 4 пробега, которые начинались в окне с чистой ото льда водой для регистрации нулевых показателей измерений (рис. 2г). Временные реализации ледовой нагрузки при протаскивании цилиндрического индентора показаны на рисунке 7.

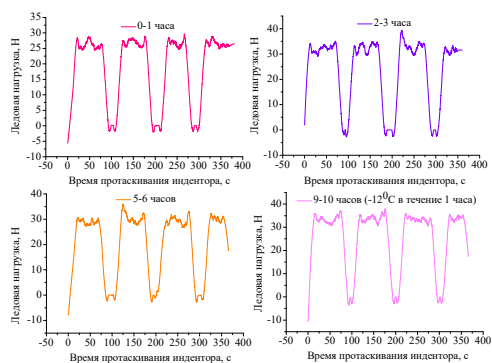


Рис. 7. Временные реализации ледовой нагрузки при 4кратном протаскивании цилиндрического индентора диаметром 30 мм в ледовом поле через определённые промежутки времени после начала эксперимента

Анализ зависимостей между напряжением внедрения индентора и временем нагружения, визуальные наблюдения и фиксация процесса в моделированном льду позволяют выделить основные этапы процессов взаимодействия. Он начинается с момента внедрения индентора и образования первой трещины в ледяном покрове.

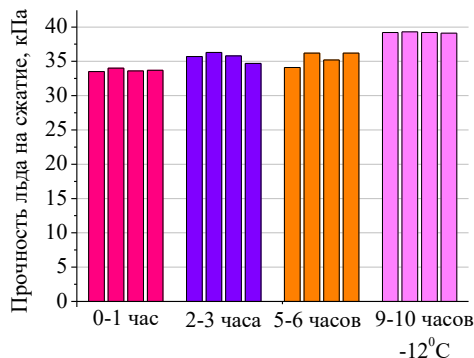


Рис. 8. Распределение значений прочности моделированного льда на сжатие через определённые промежутки времени после начала эксперимента

Далее следует разрушение некоторого объема льда, что приводит к образованию зоны смятия и возникновению радиальных трещин. Длительность этого процесса крайне мала. Затем наступает этап проникновения индентора сквозь зону смятия льда и постепенный рост напряжений, приводящий к возникновению магистральной трещины. Образуется отрыв некоторого объема льда в направлении верхней или нижней поверхностей льда. Далее, описанный процесс многократно повторяется.

Расчеты прочности льда при сжатии, выполненные с использованием формулы (3), показали, что изменений этой характеристики моделированного ледового поля вследствие температурного воздействия практически не происходит (рис. 8). Небольшие отклонения в сторону увеличения в пределах 5-7% получены только после дополнительной подморозки ледового поля на этапе VI.

Заключение

В работе изучена изменчивость основных физико-механических свойств моделированного льда типа FG в ходе модельных испытаний морских сооружений. Исследования проведены на примере моделированного ровного ледяного покрова при постоянной температуре воздуха в ледовой камере, равной -6°C , а также после ее понижения до -12°C на 1 час.

Полученные результаты показали, что в ходе экспериментов при поддержании постоянной температуры воздуха на уровне -6°C изменения прочности льда при изгибе и сжатии отсутствуют. При этом наблюдается изменение упругих свойств ледового поля, которое выражено в увеличении модуля Юнга в пределах 5% после каждого часа проводимого эксперимента.

Дополнительно выявлена закономерность изменения основных физико-механических свойств ледового поля при осуществлении дополнительной подморозки в ходе эксперимента. Воздействие температуры -12°C в течение одного часа приводит к двукратному увеличению модуля упругости ледового поля и, соответственно, росту прочности льда при изгибе, по оценкам на основе экспериментальных данных, в пределах 20%. Существенные изменения прочности льда при сжатии вследствие воздействия

столь низких температур не обнаружены. Ее рост не превысил 7%.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о необходимости дополнительного изучения упругих свойств моделированного льда. Он имеет существенно меньшую прочность и толщину, чем

натурный, поэтому целесообразно проведение специальных метрологических исследований путем получения серий данных для каждого ледового поля в диапазоне толщин его намораживания и последующей обработки этих серий по существующим рекомендациям МКОб.

Литература

1. Сазонов К.Е. Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. №2(384). С. 9-28.
2. Борусевич В. О., Русецкий А. А., Сазонов К. Е., Соловьев И. А. Современные гидродинамические лаборатории. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. - 316 с.
3. Бокатова Е.А., Сазонов К.Е. Расчет скорости движения судна по ледяному каналу в условиях сжатия при частичном взаимодействии бортов с его кромками // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. № 66(350). С. 43–46.
4. Dobrodeev AA, Klementyeva NY, Sazonov KE (2018) Large ship motion mechanics in “narrow” ice channel. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 193: 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012017>.
5. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 77–89. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
6. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 90-100. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
7. Wang, J., Lau, M., 2007, A State-of-the-art Review on ice Modelling Methodologies Employed in Refrigerated Ice Tanks, NRC-IOT report, LM-2007-05.
8. Enkvist E., Mäkinen S., 1984. A fine-grained model ice // In Proceedings of the IAHR Ice Symposium 1984, August, Hamburg, Germany. International Association for Hydraulic Research, vol. 2, p. 217-227.
9. Timofeev O.Ya., Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. New ice basin of the Krylov State Research Centre // In Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 14-18, 2015, Trondheim, Norway.
10. Test methods for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
11. Von Bock und Polach R.U.F., Ettema R., Gralher S., Kellner L., Stender M., 2019. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure, Cold Regions Science and Technology, Volume 165, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001>.
12. Sazonov, K., Klementeva, N., 2011, "Study of failure behavior for simulated ice cantilever beams", Transactions of the Krylov State Research Centre, 2011, Issue 63(347), pp.19-26.
13. Симакина А.А., 2020. Исследование влияния вариации модуля Юнга в модели разрушения ледяной балки изгибом. Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies № 4 том 1, с. 18-23.
14. Epifanov V.P., Sazonov K.E. Vliyanie stoyachih voln na lokal'nyuyu prochnost' modelirovannogo ledyanogo polya. Doklady Akademii Nauk. 2019. Vol. 489(6), pp. 564-569.
15. Zvyagin P.N., 2021. Autoregressive Model for Ice Loads Registered in Slow-speed Indentation Tests, Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 20 – 25, 2021.

References

1. Sazonov K.E., Evolution of propulsion in ice in XXI century. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 9–28 (In Russian)
2. Borusevich V. O., Rusetsky A. A., Sazonov K.E., Soloviev I. A. Modern Hydrodynamic Laboratories. — SPb.: Krylov State Research Centre, 2019. — 316 p. (In Russian)
3. Bokatova Ye, Sazonov K. Calculation of ship speed in an ice channel under ice compression and partial interaction of ship sides with channel edges. Transactions of the Krylov State Research Centre 2012; 66(350): 43–6. (in Russian)
4. Dobrodeev AA, Klementyeva NY, Sazonov KE (2018) Large ship motion mechanics in “narrow” ice channel. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 193: 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012017>.
5. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic structure. Wall side structures. Arktik: ecologia i ekonomika. — 2020. — № 4 (40). — p. 77—89. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. (In Russian)
6. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic structure. Sloping structures. Arktika: ecologia i ekonomika. . — 2021. — v. 11. № 1. — p. 90—100. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100 (In Russian)
7. Wang, J., Lau, M., 2007, A State-of-the-art Review on ice Modelling Methodologies Employed in Refrigerated Ice Tanks, NRC-IOT report, LM-2007-05.
8. Enkvist E., Mäkinen S., 1984. A fine-grained model ice. In Proceedings of the IAHR Ice Symposium 1984, August, Hamburg, Germany. International Association for Hydraulic Research, vol. 2, p. 217-227.

9. Timofeev O.Ya., Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. New ice basin of the Krylov State Research Centre // In Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 14-18, 2015, Trondheim, Norway.
10. Test methods for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
11. Von Bock und Polach R.U.F., Ettema R., Gralher S., Kellner L., Stender M., 2019. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure, Cold Regions Science and Technology, Volume 165, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001>.
12. Sazonov, K., Klementeva, N., 2011, "Study of failure behavior for simulated ice cantilever beams", Transactions of the Krylov State Research Centre, 2011, Issue 63(347), pp.19-26.
13. Simakina A.A., 2020. Investigation of Young modulus variations in ice beam failure model by bending. Marine intellectual technologies No. 4 v 1, p. 18-23. (in Russian).
14. Epifanov V.P., Sazonov K.E. Vliyaniye stoyachih voln na lokal'nyuy prochnost' modelirovannogo ledyanogo polya. Doklady Akademii Nauk. 2019. Vol. 489(6), pp. 564-569.
15. Zvyagin P.N., 2021. Autoregressive Model for Ice Loads Registered in Slow-speed Indentation Tests, Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 20 – 25, 2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Алексеевич Добродеев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, доцент кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, заместитель начальника лаборатории-начальник сектора лаборатории ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Aleksei A. Dobrodeev, Ph.D. (Eng), Senior Researcher of Laboratory of ice engineering research fundamentals at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, Assistant Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, Deputy Ice Lab Head, Krylov State Research Centre, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: stamukha@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.03.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 14.02.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 02.04.2022.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.039>

Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна в условиях мелководья

В.Ю. Семенова¹ sem_viktoria@mail.ru, Д.А. Альбаев¹ albaevdanil@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных взаимодействием набегающего, дифрагированного волнения и волнения, обусловленного различными видами колебаний на основании применения трехмерной потенциальной теории в условиях мелководья. Для их определения необходимо вычисление потенциалов второго порядка малости. Представленное решение в отечественной практике является новым. Решение задачи осуществляется на основании методов малого параметра и интегральных уравнений с учетом нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. В работе расчет интегралов по свободной поверхности проводится напрямую за счет их сходимости на бесконечном удалении от судна. Нелинейные силы и моменты определяются в работе с использованием различных функций Грина для жидкости ограниченной глубины. Приводятся результаты расчетов нелинейных сил и моментов для разных судов. Расчеты представлены в сравнении с расчетами по двумерной теории, выполненными также для случая жидкости ограниченной глубины. Показано хорошее согласование результатов между собой в большинстве случаев. Показано значительное влияние уменьшения относительной глубины на все составляющие нелинейных сил без исключения, независимо от вида качки и типа судна.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, потенциал второго порядка, функция Грина, нелинейные силы, взаимодействие набегающего волнения и качки, мелководье

Для цитирования: Семенова В.Ю., Альбаев Д.А., Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна в условиях мелководья, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 37—45.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.039>

Determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions in shallow water conditions

Viktoriya Yu. Semenova¹ sem_viktoria@mail.ru, Danil A. Al'baev¹ albaevdanil@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article considers the definition of nonlinear second-order forces caused by the interaction of incoming, diffracted waves and waves caused by various types of motions based on the application of three-dimensional potential theory in the conditions of shallow water. To determine them, it is necessary to calculate the potentials of the second order of smallness. The presented solution is new in domestic practice. The problem is solved on the basis of small parameter methods and integral equations taking into account the nonlinear boundary condition on the free surface of the liquid. The paper shows the possibility of calculating the integrals over the free surface directly due to their convergence at an infinite distance from the ship. Nonlinear forces and moments are determined in the work using Green's function for a fluid of limited depth. The results of calculations of nonlinear forces and moments for different ships are presented. The calculations are presented in comparison with the calculations according to the two-dimensional theory, performed also for the case of a liquid of limited depth. A good agreement of the results is shown among themselves in most cases. A significant effect of a decrease of relative depth on all components of non-linear forces without exception, regardless of the type of ship's motions and type of ship, is shown.

Keywords: method of the integral equations, three-dimensional potential theory, the potential of the second order, Green's function, nonlinear forces, interaction of waves and motions of ship, shallow water

For citation: Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev, Determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions in shallow water conditions, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 37—45.

Введение

В работах авторов [2], [3] было рассмотрено определение нелинейных сил и моментов, обусловленных отдельными видами поперечной качки: поперечно-горизонтальной, вертикальной и

бортовой [2], и взаимодействием дифрагированного и набегающего волнения между собой [3].

Между тем, согласно применению метода малого параметра [1], [5] суммарные нелинейные силы, действующие на судно, будут содержать составляющие, обусловленные взаимодействием отдельных видов качки с набегающим и

дифрагированным волнением. Определение данных сил было рассмотрено авторами в работе [4], но для случая бесконечно-глубокой жидкости.

В работе Со Чжо Ту [5], [6] было проведено определение нелинейных сил, возникающих при взаимодействии отдельных видов поперечных колебаний шпангоутных контуров и волнения на основании гипотезы плоских сечений. Приведены результаты изменения данных сил в зависимости от относительной глубины для различных типов шпангоутных контуров и, затем, для некоторых типов судов в целом. Основная трудность решения данной задачи на основании двумерной теории заключается в необходимости применения специальной процедуры учета нелинейного граничного условия на свободной поверхности из-за появления расходящихся интегралов. Это можно избежать путем применения трехмерных методов.

В работах, выполненных на основании трехмерной теории [8], [9], [10], [11], [12] отдельно не выделяются рассматриваемые составляющие нелинейных сил. Приводятся только значения суммарных нелинейных сил для весьма ограниченного числа объектов.

Как показывают результаты работы [5], составляющие нелинейных сил, обусловленные взаимодействием поперечных видов колебаний и волнения оказывают значительное влияние на суммарные нелинейные силы и их вычислением пренебрегать нельзя.

Настоящая работа является продолжением цикла работ авторов [2], [3], [4] в которой рассматривается определение вышеупомянутых составляющих нелинейных сил на основании трехмерной теории в условиях мелководья.

Описание метода

На основании метода малого параметра [1], [5], граничное условие на смоченной поверхности второго порядка потенциала от взаимодействия каждого вида колебаний и волнения имеет вид:

$$\frac{d\Phi_{k7}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi_{07}^{(1)} - \nabla\Phi_{07}^{(1)}N^{(1)} \quad (1)$$

где

$$\bar{X}^{(1)} = \begin{Bmatrix} \xi_g^{(1)} + (\psi_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta_m^{(1)}y - \psi_m^{(1)}x) \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

$$N^{(1)} = \begin{Bmatrix} \psi^{(1)}\cos(n,z) - \chi^{(1)}\cos(n,y) \\ -\theta^{(1)}\cos(n,z) + \chi^{(1)}\cos(n,x) \\ \theta^{(1)}\cos(n,y) - \psi^{(1)}\cos(n,x) \end{Bmatrix}$$

$$n = \begin{Bmatrix} \cos(n,x) \\ \cos(n,y) \\ \cos(n,z) \end{Bmatrix}.$$

Разбив суммарный потенциал набегающего и дифрагированного волнения Φ_{07} на сумму их симметричной и асимметричной частей [5] Φ_{07s} и Φ_{07A} и подставляя их в граничное условие (1), получим выражения для симметричной и асимметричной задачи для каждого вида колебаний.

Граничное условие на свободной поверхности второго порядка для потенциала от взаимодействия колебаний и волнения также можно представить в виде симметричной и несимметричной части.

Для симметричной:

$$Q_{Fk7s} = -2\frac{i\omega}{g}(\nabla\Phi_k \cdot \nabla\Phi_{07s}) + \frac{i\omega}{2g}\Phi_k^{(1)}\left(\frac{\partial^2\Phi_{07s}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_{07s}}{\partial z}\right) + \frac{i\omega}{2g}\Phi_{07s}\left(\frac{\partial^2\Phi_k}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_k}{\partial z}\right), \quad (3)$$

где $\Phi_{07s} = \Phi_{0s} + \Phi_{7s}$ – сумма симметричных частей потенциалов набегающего и дифракционного волнения; Φ_k ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) – потенциал произвольного вида качки.

Для асимметричной части:

$$Q_{Fk7A} = -2\frac{i\omega}{g}(\nabla\Phi_k \cdot \nabla\Phi_{07A}) + \frac{i\omega}{2g}\Phi_k^{(1)}\left(\frac{\partial^2\Phi_{07A}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_{07A}}{\partial z}\right) + \frac{i\omega}{2g}\Phi_{07A}\left(\frac{\partial^2\Phi_k}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_k}{\partial z}\right), \quad (4)$$

где $\Phi_{07A} = \Phi_{0A} + \Phi_{7A}$ – сумма асимметричных частей потенциалов набегающего и дифракционного волнения.

Обход вторых производных осуществляется с учетом свойств симметрии Φ_k , Φ_{07s} , Φ_{07A} и будет рассмотрен ниже.

Потенциал набегающего волнения первого порядка в случае жидкости ограниченной глубины:

$$\Phi_0^{(1)} = -\frac{ig}{\omega}a_w\frac{\text{ch}(\mu_0(z+H))}{\text{ch}(\mu_0H)}e^{i\mu_0(x\cos\beta+y\sin\beta)}e^{-i\omega t} \quad (5)$$

Для определения потенциалов $\Phi_{k7s}^{(2)}$, $\Phi_{k7A}^{(2)}$ используется метод интегральных уравнений, согласно которому:

$$-\frac{1}{2}\Phi_{k7s}^{(2)}(x,y,z) + \frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\Phi_{k7s}^{(2)}(\xi,\eta,\zeta)\frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}d\Omega = -\frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\frac{d\Phi_{k7s}^{(2)}}{dn}G^{(2)}d\Omega + \frac{1}{4\pi}\iint_{S_F}Q_{Fk7s}G^{(2)}dS_F. \quad (6)$$

$$-\frac{1}{2}\Phi_{k7A}^{(2)}(x,y,z) + \frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\Phi_{k7A}^{(2)}(\xi,\eta,\zeta)\frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}d\Omega = -\frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\frac{d\Phi_{k7A}^{(2)}}{dn}G^{(2)}d\Omega + \frac{1}{4\pi}\iint_{S_F}Q_{Fk7A}G^{(2)}dS_F. \quad (7)$$

Полученные уравнения (6) и (7) являются интегральными уравнениями Фредгольма второго рода. Для численного решения смоченная и свободная поверхность разбивается на конечное число плоских панелей также как и в предыдущих задачах [2], [3], [4]. Такой подход трансформирует исходное интегральное уравнение в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных потенциалов.

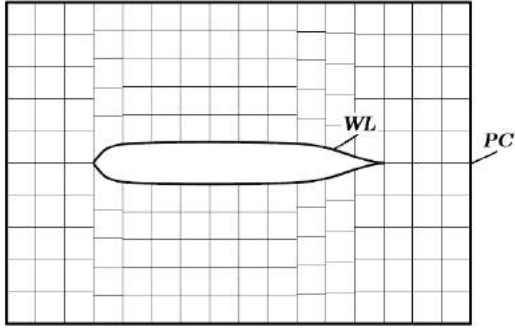


Рис. 1. Разбиение свободной поверхности на панели

Функция Грина $G^{(2)}$ может быть определена по формуле для жидкости ограниченной глубины [7]:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^\infty \frac{2(k + 4\nu)e^{-kh} \cosh k(z + h)}{k \sinh kh - 4\nu \cosh kh} \cdot \cosh k(\zeta + h) J_0(kR) dk + i2\pi \frac{2((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2) \cosh 4\mu_0(z + h)}{((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2)h + 4\nu \cdot \cosh 4\mu_0(\zeta + h) J_0(\mu_0 R)}. \quad (8)$$

Здесь

$$r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2};$$

$$r_1 = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta)^2};$$

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2};$$

$$\nu = \frac{\omega^2}{g} - \text{волновое число};$$

μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид: $\mu_0 \tanh(\mu_0 H) = \nu$;

J_0 – функция Бесселя.

В выражениях (6) и (7) интеграл \iint_{S_F} берется по свободной поверхности. При численной реализации свободная поверхность разбивается на прямоугольные панели (рис. 1), при этом сходимость интеграла обеспечивается достаточной протяжённостью вправо и влево от судна благодаря тому, что пределы интегралов по свободной поверхности на бесконечности равны $1/R$.

Основные трудности решения задачи возникают при определении вторых производных, входящих в граничные условия на смоченной и свободной поверхности. Благодаря использованию векторных преобразований, теоремы Стокса и теоремы Гаусса [9], [10] вычисления данных производных можно избежать вообще и получить следующие выражения, входящие в правые части уравнения (6) и (7).

Тогда для следующих видов качки будем иметь:

- поперечно-горизонтальная качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \nabla \frac{d\Phi_{27}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = -\frac{i}{2} \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, y) d\Omega + \\ & \quad + \frac{i}{2} \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl. \end{aligned} \quad (9)$$

- вертикальная качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \nabla \frac{d\Phi_{37}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = -\frac{i}{2} \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, z) d\Omega + \\ & \quad + \frac{i}{2} \zeta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} s_x - \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} s_y \right] G^{(2)} dl. \end{aligned} \quad (10)$$

- бортовая качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \theta_m^{(1)} \iint_{\Omega} \nabla \frac{d\Phi_{47}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = -\frac{i}{2} \theta_m^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (y \cdot \cos(n, z) - z \cdot \cos(n, y)) d\Omega + \\ & \quad + \frac{i}{2} \theta_m^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} y s_x - \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} y s_y \right] G^{(2)} dl. \end{aligned} \quad (11)$$

- килевая качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \psi_m^{(1)} \iint_{\Omega} \nabla \frac{d\Phi_{57}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = -\frac{i}{2} \psi_m^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (z \cdot \cos(n, x) - x \cdot \cos(n, z)) d\Omega + \\ & \quad + \frac{i}{2} \psi_m^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} x s_y - \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} x s_x \right] G^{(2)} dl. \end{aligned} \quad (12)$$

Обход вторых производных на свободной поверхности осуществляется по общей формуле [4]

$$\begin{aligned} & \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F = \\ & = - \iint_{WL+PC} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_{07}^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + \\ & + \iint_{S_F} (\nabla \Phi_k^{(1)} \nabla \Phi_{07}^{(1)}) G^{(2)} dS_F + \\ & + \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_{07}^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F. \end{aligned} \quad (13)$$

При обходе вторых производных на свободной поверхности учитываются следующие свойства симметрии:

1. Для симметричных потенциалов $\Phi_3, \Phi_{07S}, \Phi_5$:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \Phi(x, -y); \\ \Phi_x(x, y) &= \Phi_x(x, -y); \\ \Phi_y(x, y) &= -\Phi_y(x, -y). \end{aligned} \quad (14)$$
2. Для несимметричных потенциалов $\Phi_2, \Phi_4, \Phi_{07S}$:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= -\Phi(x, -y); \\ \Phi_x(x, y) &= -\Phi_x(x, -y); \\ \Phi_y(x, y) &= \Phi_y(x, -y). \end{aligned} \quad (15)$$

Следовательно, в интегралах, входящих в (15):

$$\begin{aligned} & \iint_{S_F} (\nabla \Phi_3 \cdot \nabla \Phi_{07S}) G^{(2)} dS_F = \\ & = \iint_{S_{FR}} \left(\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FR} + \\ & + \iint_{S_{FL}} \left(\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FL}; \\ & \iint_{S_F} (\nabla \Phi_3 \cdot \nabla \Phi_{07A}) G^{(2)} dS_F = \\ & = \iint_{S_{FR}} \left(\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FR} - \\ & - \iint_{S_{FL}} \left(\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FL}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{S_F} (\nabla \Phi_2 \cdot \nabla \Phi_{07S}) G^{(2)} dS_F = \\ & = \iint_{S_{FR}} \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FR} - \\ & - \iint_{S_{FL}} \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07S}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FL}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \iint_{S_F} (\nabla \Phi_2 \cdot \nabla \Phi_{07A}) G^{(2)} dS_F = \\ & = \iint_{S_{FR}} \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FR} + \\ & + \iint_{S_{FL}} \left(\frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07A}^{(1)}}{\partial y} \right) G^{(2)} dS_{FL}. \end{aligned}$$

Здесь S_{FR} – правая часть свободной поверхности, S_{FL} – левая часть. Аналогичным образом берутся согласно условиям симметрии и другие интегралы, входящие в выражение (15).

Давление второго порядка от дифрагированного волнения определяется уравнением Лагранжа-Коши:

$$\begin{aligned} p_{k7}^{(2)} &= -\rho \frac{\partial \Phi_{k7}^{(2)}}{\partial t} - \\ & - \frac{1}{2} \rho \left[2 \left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial x} \right) + 2 \left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial y} \right) \right. \\ & \left. + 2 \left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial \Phi_{07}^{(1)}}{\partial z} \right) \right] \\ & (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \end{aligned} \quad (17)$$

Нелинейные силы и моменты могут быть получены прямым интегрированием давления по смоченной поверхности.

Анализ результатов

На основании изложенного были разработаны программы, реализующие определение нелинейных сил и моментов, обусловленных взаимодействием отдельных видов колебаний судна и волнения с использованием функции Грина ограниченной глубины (8) при различных Н/Т.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для четырех различных типов судов при курсовом угле $\beta = 90$. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Танкер "Баскунчак"	74	12	4.65	0.71	0.8
Балкер "Капитан Панфилов"	134	20.6	9.4	0.78	0.88
Лесовоз "Николай Новиков"	140	21	8.68	0.74	0.83
Сухогруз "Новгород"	138	20.6	9	0.68	0.79

На рисунках 2-3 приведены изменения граничных условий на свободной поверхности при различных Н/Т. Из приведенных результатов видно, что увеличение относительной глубины приводит к

значительному уменьшению влияния нелинейности, обусловленной граничным условием на свободной поверхности. Также видно, что граничные условия представляют собой затухающие, осциллирующие

функции. Поэтому, для валидации программ были выполнены расчеты нелинейных сил при различной протяженности свободной поверхности вправо и влево от судна. (рис.4,5.). Протяженность характеризуется параметром N, показывающим число панелей, приходящихся на одно шпангоутное сечение в одну сторону от судна

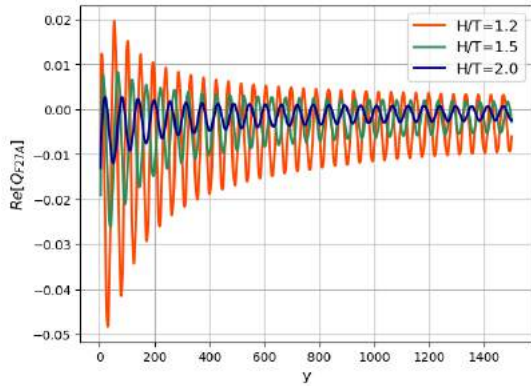


Рис.2. Реальная часть Q_{F27A} на свободной поверхности для танкера "Баскунчак" при различных H/T

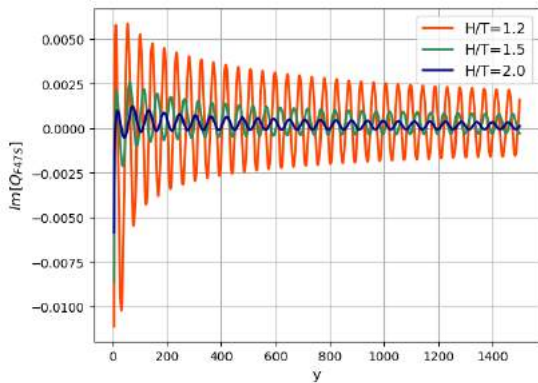


Рис.3. Мнимая часть Q_{F47A} на свободной поверхности для танкера "Баскунчак" при различных H/T

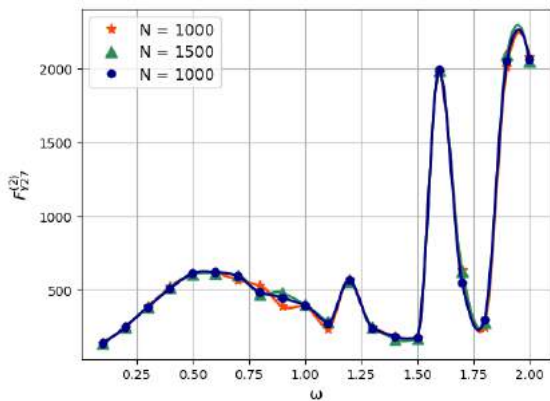


Рис. 4. $F_{Y27}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" при различном при различном верхнем пределе интеграла по свободной поверхности

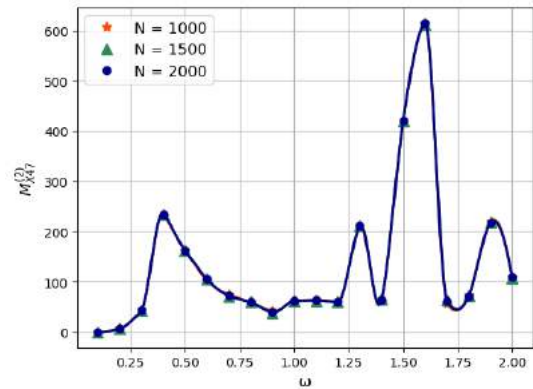


Рис. 5. $M_{X47}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" при различном верхнем пределе интеграла по свободной поверхности

Полученные результаты показали полное согласование расчетов различных составляющих нелинейных сил при изменении параметра N. Ясно, что сеточная сходимость по свободной поверхности достигнута.

Для валидации расчетного метода далее приводятся сравнения различных составляющих нелинейных сил, полученных по разработанной программе с расчетами по двумерной теории [6]. Сравнения представлены на рис. 6-13. Приведенные результаты показывают хорошее согласование с двумерной теорией за исключением зон нерегулярных частот, особенно характерных для двумерного метода.

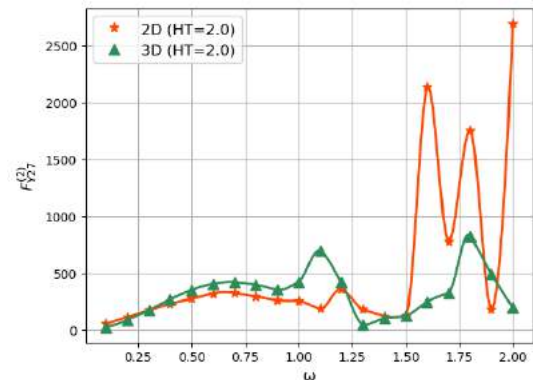


Рис. 6. Сравнение $F_{Y27}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 2.0$)

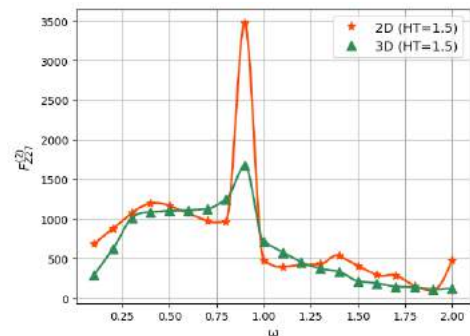


Рис. 7. Сравнение $F_{Z27}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 1.5$)

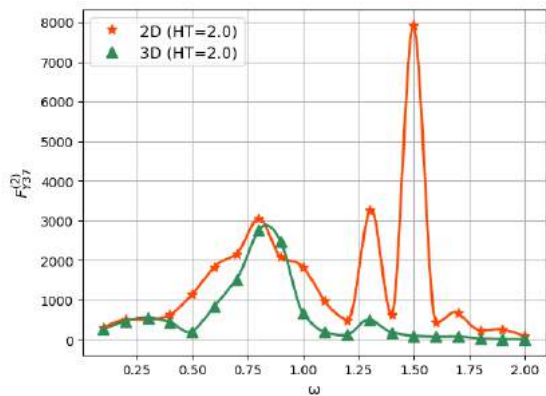


Рис. 8. Сравнение $F_{Y37}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 2.0$)

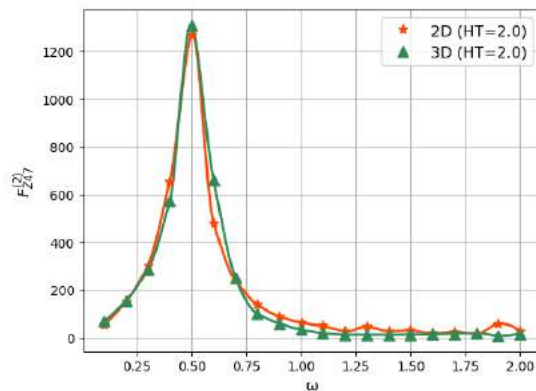


Рис. 11. Сравнение $F_{Z47}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 2.0$)

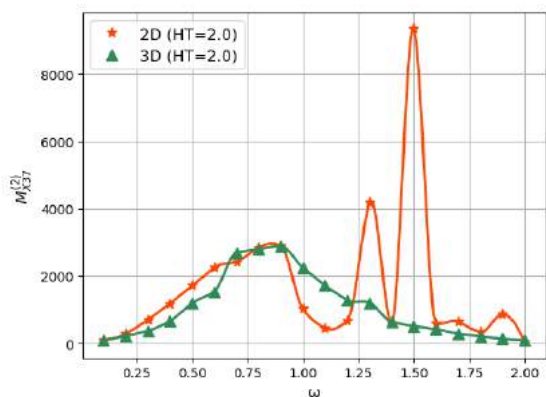


Рис. 9. Сравнение $M_{X37}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 2.0$)

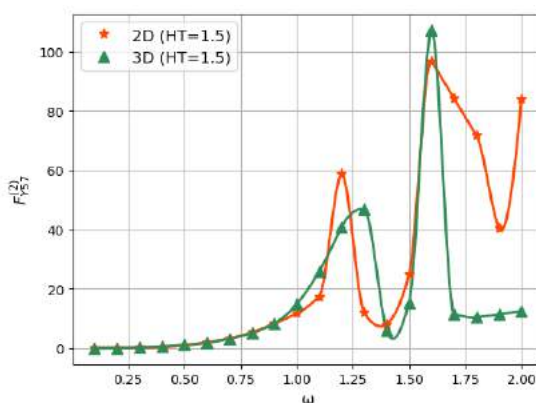


Рис. 12. Сравнение $M_{X57}^{(2)}$ для сухогруза "Новиков" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 1.5$)

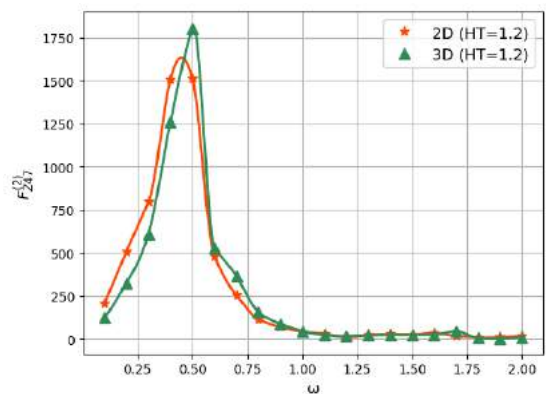


Рис. 10. Сравнение $F_{Z47}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 1.2$)

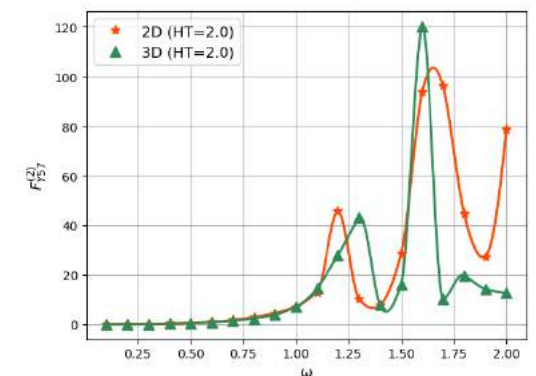


Рис. 13. Сравнение $F_{Y57}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" по двумерной и трехмерной теории ($H/T = 2.0$)

На рис.14-20 приведены результаты расчетов различных составляющих нелинейных сил и моментов в зависимости от изменения относительной глубины. Были рассмотрены взаимодействия поперечно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и килевой качки с набегающим и дифрагированным волнением при расположении различных типов судов лагом.

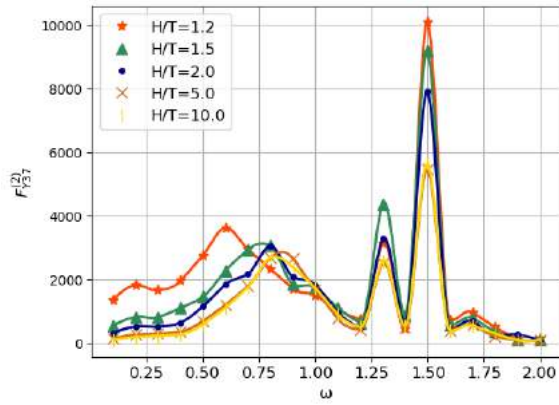


Рис. 14. $F_{Y37}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" при различных H/T

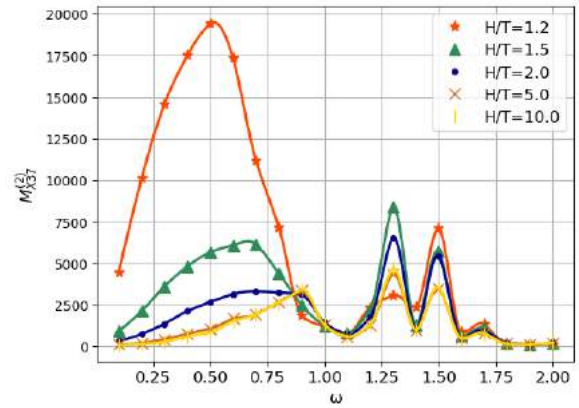


Рис. 17. $M_{X37}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков" при различных H/T

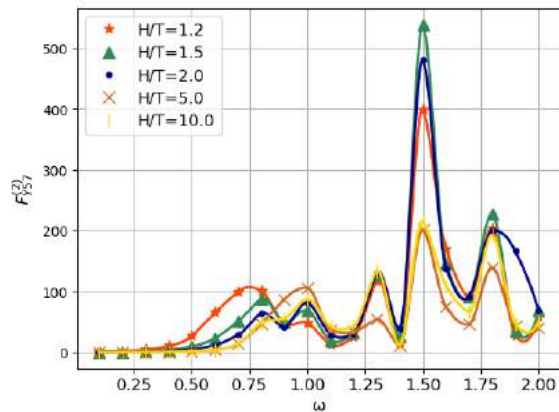


Рис. 15. $F_{Y57}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" при различных H/T

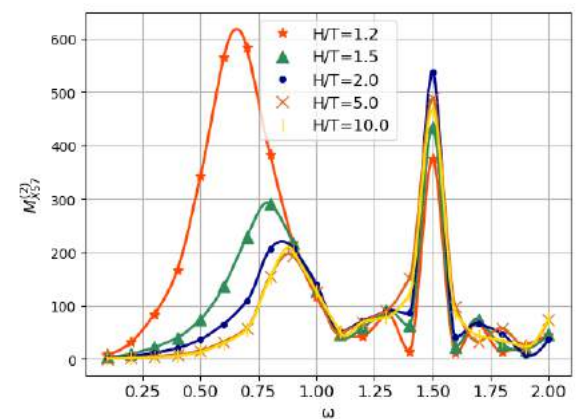


Рис. 18. $M_{X57}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков" при различных H/T

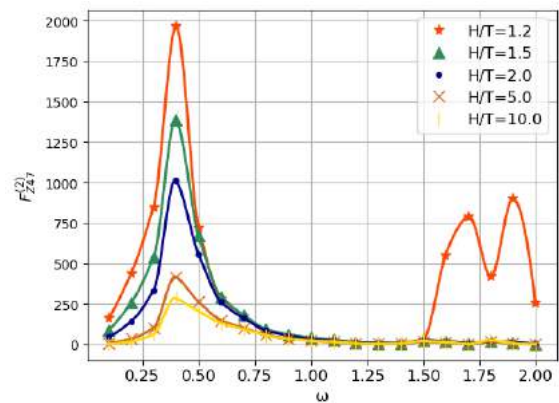


Рис. 16. $F_{Z47}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" при различных H/T

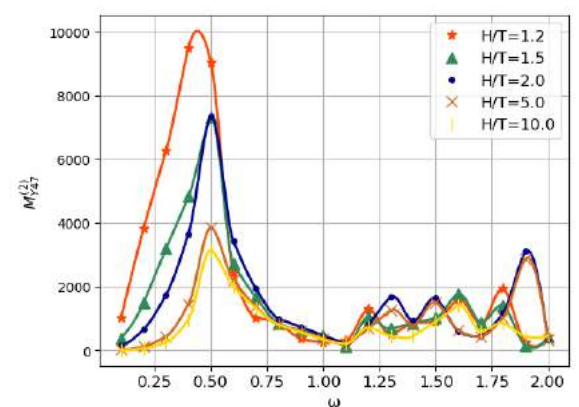


Рис. 19. $M_{Y47}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов" при различных H/T

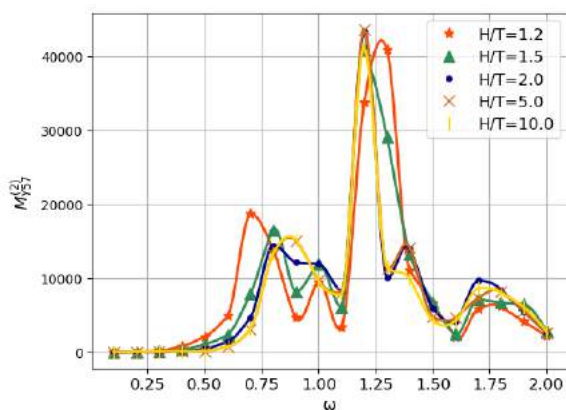


Рис. 20. $M_{Y57}^{(2)}$ для балкера «Капитан Панфилов» при различных H/T

Проведенные расчеты для различных типов судов показали, что все без исключения составляющие нелинейных сил и моментов значительно увеличиваются при уменьшении относительной глубины H/T . Наиболее ярко это проявляется в зоне частот $\omega < 1$ (рис.14-20). Так, для сухогруза «Новгород» на частоте $\omega = 0.5$ наблюдается трехкратное увеличение горизонтальной силы $F_{Y37}^{(2)}$ при $H/T = 1.2$ по сравнению с $H/T = 10$ (рис.14). Значения момента $M_{X37}^{(2)}$ на той же частоте для лесовоза «Николай Новиков» в 20 раз больше соответствующего значения при $H/T = 10$ (рис.17). Наиболее значительные изменения нелинейных сил происходят при значениях $H/T < 5$. При $H/T = 5$ и ее дальнейшем увеличении значения нелинейных сил не меняются и совпадают с соответствующими значениями для бесконечно-глубокой жидкости.

Результаты расчетов показали, что для всех составляющих нелинейных сил характерен сдвиг их максимальных значений в область низких частот. Например, максимальное значение момента при килевой качке $M_{X57}^{(2)}$ для лесовоза «Николай Новиков» при $H/T = 1.2$ имеет место на частоте $\omega = 0.625$, а при $H/T = 5$ на частоте $\omega = 0.875$ (рис.18). Максимальное значение момента при бортовой качке балкера «Капитан Панфилов» $M_{Y47}^{(2)}$ при $H/T = 1.2$ имеет место на частоте $\omega = 0.375$, а при относительной глубине $H/T = 10$ на частоте $\omega = 0.5$. Положение максимальных значений нелинейных сил совпадает с положением резонансных амплитуд вертикальной, бортовой и килевой качки и обусловлено непосредственно их влиянием.

В зоне частот $\omega > 1$ влияние относительной глубины на нелинейные силы проявляется в меньшей степени (рис.14-20)

Заключение

В статье рассмотрен метод определения нелинейных сил, обусловленных взаимодействием различных видов колебаний судна и волнения на основании трехмерной потенциальной теории и метода интегральных уравнений. В отличие от двумерной теории, метод позволяет избежать трудоемкого вычисления интегралов, учитывающих влияние нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. Разработанная программа может быть использована для различных сочетаний относительных глубин и курсовых углов.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при оценке суммарных нелинейных сил, действующих на судно в условиях регулярного волнения в жидкости ограниченной глубины.

Литература

1. Семенова В. Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ.
2. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, N4, т3. С.18-28
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А (2021) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно в условиях мелководья на основании использования трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии, N3, т1. С.25-34
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, т.2. С. 21-31.
5. Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дис. – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
6. Со Чжо Ту (2012) Расчет нелинейных гидродинамических сил и моментов второго порядка, возникающих при колебаниях шпангоутных контуров на регулярном волнении в жидкости ограниченной глубины. Морской вестник, Труды СПбГМТУ, выпуск N1 (124), с.28-31
7. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
8. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
9. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
10. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
11. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13th Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331
12. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, с.165-185.

References

1. Semenova V. Ju. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelinejnoj kachki sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPbGMTU.
2. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2020) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovod'e. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4, t3. S.18-28
3. Semenova V.Yu., Al'baev D.A (2021) Opredelenie nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystvuyushchikh na sudno v usloviyakh melkovod'ya na osnovanii ispol'zovaniya trekhmernoy potentsial'noy teorii. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N3, t1. S.25-34
4. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2021) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 4, t.2. S. 21-31
5. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelinejnykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water]: dis. – Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy tekhnicheskij universitet
6. So Chzho Tu (2012) Raschet nelineynykh gidrodinamicheskikh sil i momentov vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri kolebaniyakh shpangoutnykh konturov na regul'yarom volnenii v zhidkosti ogranichennoy glubiny. Morskoy vestnik, Trudy SPbGMTU, vypusk N1 (124), s.28-31
7. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014
8. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
9. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
10. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
11. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13th Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331.
12. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, c.165-185.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Данил Айдарович Альбаев, ассистент кафедры теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.02.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.02.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 03.04.2022.

Научная статья

УДК 629.5.035

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.040>**Метод расчета гребного лопастного движителя на основе плоских сечений**А.Ю. Яковлев¹ kgm@smtu.ru, С.И. Чепурко¹ kgm@smtu.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

Аннотация. В статье представлен метод расчета гребного лопастного движителя. Гребной лопастной движитель представляет собой запатентованное техническое решение, реализующее принцип создания тяги за счет гребка, осуществляемого лопастями. Лопасти предполагается устанавливать на обоих бортах исследовательского подводного аппарата. Метод основан на гипотезе плоских сечений, моделировании отрывного обтекания по формуле Рейлея, использовании упрощенной схемы расчета характеристик гидродинамических профилей. Для моделирования нестационарных эффектов при работе движителя используются коэффициенты присоединенных масс. Разработанный метод верифицирован путем сопоставления результатов расчета с ранее выполненными CFD расчетами гребных лопаток в пакете OpenFOAM. Показана удовлетворительная точность прогнозирования сил, действующих на гребной лопатке. В дальнейшем предполагается использовать разработанный метод при проектировании и оптимизации гребных лопастных движителей.

Ключевые слова: движитель, гребная лопатка, численный метод, присоединенные массы, методы вычислительной гидромеханики, отрывное обтекание

Для цитирования: Яковлев А.Ю., Чепурко С.И. Метод расчета гребного лопастного движителя на основе плоских сечений. 2022. № 2 часть 2. С. 46—52.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.040>**Calculation method of paddling blades propulsor based on the flat sections theory**Aleksey Yu. Yakovlev¹ kgm@smtu.ru, Sergey I. Chepurko¹ kgm@smtu.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article presents a method for calculating the paddling blades propulsor. The paddling blades propulsor is a patented technical solution that implements thrust creation due to paddling by the blades. The blades are supposed to be installed on both sides of the research underwater vehicle. The method is based on the hypothesis of flat sections, modeling of the separation flow by the Rayleigh formula, using a simplified calculating scheme of the hydrofoil section characteristics. The added mass coefficients are used to simulate non-stationary effects during the operation of the propulsor. The developed method is verified by comparing the calculation results with previously performed CFD calculations of the paddling blades. Satisfactory forecasting accuracy of forces acting on the paddling blade is shown. In the future, it is planned to use the developed method in the design and optimization of paddling blade propulsors.

Keywords: propulsor, paddling blade, computational method, added masses, CFD method, separation flow

For citation: Aleksey Yu. Yakovlev, Sergey I. Chepurko, Calculation method of paddling blades propulsor based on the flat sections theory. 2022. № 2 part 2. P. 46—52.

Введение

Для расчета движителей используется множество различных методов. Наибольшее число подобных методов разработано для определения характеристик гребных винтов, а так же сходных с ними по принципу создания тяги движителей (гребных винтов в насадке, водометных движителей и т. п.) [1].

Для поверочного расчета гребных винтов, в результате которого проверяется правильность найденной конфигурации движителя, в настоящее время находят применение методы вычислительной гидромеханики, основанные на решении системы уравнений Навье-Стокса (CFD-методы) и методы граничных интегральных уравнений (BEM) [2]. Для целей проектирования и оптимизации гребных винтов, в рамках так называемого проектировочного расчета, используются упрощенные математические модели на основе плоских сечений и теории несущей

линии [1]. Для простейшей оценки ожидаемых характеристик гребных винтов применяются специальные диаграммы [3]. Применение CFD и BEM методов для проектирования гребных винтов пока ограничивается исследовательскими работами.

Однако, помимо гребных винтов и других движителей, создающих тягу за счет работы крыла, существуют и иные типы движителей. Весельные движители, гребные колеса и им подобные создают тягу за счет использования силы сопротивления движению лопастей. Методы расчета движителей этих типов развиты в существенно меньшей степени. Что объясняется отсутствием интереса к ним на протяжении второй половины XX века по причине успешного применения гребных винтов. Среди известных методов расчета можно указать на классические методы проектирования и расчета гребных колес [4]. Аналогичные подходы используются до настоящего времени при разработке водяных колес гидротурбин [5]. В последнее время, в связи с разработкой новых типов

двигателей и конструкций гребных колес, появился ряд работ, в которых для расчета подобных двигателей используются CFD-методы [6], [7].

Учитывая вновь возникший интерес к гребным типам двигателей, возникает необходимость их всестороннего исследования и проведения проектировочного расчета. Известно большое число разработок двигателей гребного типа [8], [9], [10], которые отнюдь не сводятся к классическим гребным колесам. Однако для них практически отсутствуют расчетные методы, что не позволяет продвинуться дальше первоначальной идеи. Для этих целей, по аналогии с гребными винтами, представляется рациональным разрабатывать упрощенные математические модели, позволяющие проводить анализ характеристик большого числа вариантов и служащих основой для проектировочного расчета.

Целью данной работы является разработка упрощенного метода расчета характеристик гребного лопастного двигателя (ГЛД), запатентованного в качестве двигателя подводных аппаратов [11]. Ранее были выполнены расчеты работы лопаток ГЛД с помощью CFD-метода [7], что позволило использовать их результаты для верификации разрабатываемого упрощенного метода.

Гребной лопастной двигатель

ГЛД согласно [11] представляет собой пару лопастей прямоугольной формы. Продольное сечение лопастей рекомендуется задавать в виде хорошо обтекаемого гидродинамического профиля. Лопастей ГЛД предполагается устанавливать на боковых сторонах подводного исследовательского аппарата (рис. 1).

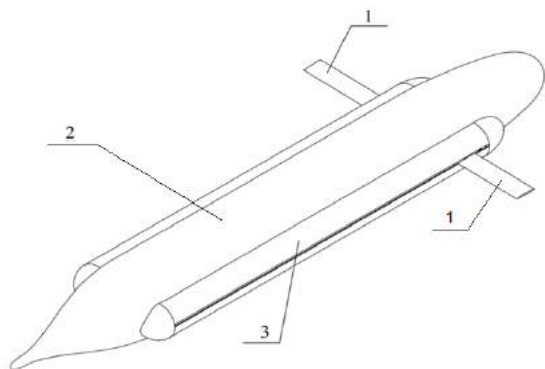


Рис. 1. Расположение ГЛД на подводном аппарате 1 – лопасти ГЛД, 2 – корпус аппарата, 3 – привод лопастей и его обтекатель

Принцип работы ГЛД состоит в отбрасывании воды назад по направлению движения аппарата, за счет движения в корму лопастей развернутых поперек потока. Развиваемая в процессе гребка тяга зависит от периода гребка T и длины пути перемещения лопастей. При приближении лопастей к крайнему кормовому положению осуществляется их разворот на 90° градусов. В результате лопасти устанавливаются вдоль направления движения аппарата. Далее выполняется перемещение лопастей в крайнее носовое расположение. При приближении лопастей к этому положению вновь выполняется их разворот на 90° градусов, но теперь лопасти вновь устанавливаются поперек направления движения. Далее выполняется гребок и

описанный цикл повторяется. Таким образом, силы, действующие на лопастях имеют нестационарный характер и повторяются с периодом T .

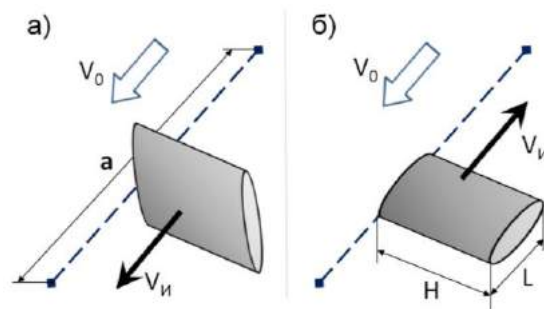


Рис. 2. Принцип работы ГЛД а – движение лопасти в корму (гребок), б – движение лопасти в нос

Тяга двигателя, в рамках представленной схемы работы, создается на режиме гребка. При возвратном ходе лопасти создают сопротивление, направление действия которого обратно тяге. Но за счет разворота лопастей вдоль потока удается существенно снизить силу сопротивления. Выбор хорошо обтекаемого гидродинамического профиля в качестве формы продольного сечения лопастей позволяет снизить величину сопротивления до минимума. Наличие двух побортно расположенных лопастей позволяет аппарату уверенно маневрировать в горизонтальной плоскости при любых скоростях его перемещения. При движении лопастей на них будет возникать не только продольная, но и поперечная сила, что можно использовать для улучшения маневренности аппарата в трехмерном пространстве. Реверс аппарата так же легко осуществляется путем изменения направления гребка.

Упрощенная математическая модель работы ГЛД

Математическая модель двигателя является основным инструментом, используемым при его проектировании и разработке. По аналогии с гребными винтами математическая модель, предназначенная для проектировочного расчета, реализована на основе гипотезы плоских сечений.

В рамках разработанной математической модели конфигурация ГЛД характеризуется следующими линейными размерами (см. рис. 2): длина хорды лопасти L , размах лопасти H , амплитуда колебаний лопасти a . Так же в качестве параметров работы двигателя можно рассматривать период колебаний лопасти T и скорость набегающего потока (скорость движения аппарата) V_0 . При этом возможно задание различных законов колебаний лопастей, включающих закон поступательного перемещения лопасти вдоль оси Ox $x(t)$ и закон поворота лопасти относительно оси ее вращения $\beta(t)$. Кроме того, будем считать, что расположение ГЛД на корпусе аппарата таково (см. рис. 1), что величину попутного потока можно приближенно считать равной нулю.

Для последующего анализа удобно ввести ряд безразмерных параметров, которые будут характеризовать особенности геометрии двигателя и режимов его работы. Параметры вводятся, таким образом, чтобы провести аналогию с известными

безразмерными характеристиками гребных винтов и других традиционных движителей. Все линейные размеры далее будут относиться к длине хорды лопасти L . Тогда форму ГЛД можно характеризовать двумя линейными параметрами:

относительным удлинением лопасти λ

$$\lambda = \frac{H}{L} \quad (1)$$

относительным размахом колебаний лопасти \bar{a}

$$\bar{a} = \frac{a}{L} \quad (2)$$

Для характеристики режима работы движителя, по аналогии с гребным винтом, вводится понятие относительной поступи движителя J , которое связано обратным отношением с числом Струхала Sh :

$$J = \frac{\pi}{Sh} = \pi \frac{V_0 T}{L} \quad (3)$$

где $Sh = \frac{L}{V_0 T}$ – число Струхала.

Помимо этих характеристик можно ввести дополнительное понятие относительной средней скорости движения лопасти \bar{w}_0 , которая может быть выражена через поступь J :

$$\bar{w}_0 = \frac{a}{V_0 T} = \frac{\pi \bar{a}}{J} \quad (4)$$

А так же, поступь по амплитуде колебаний J_a :

$$J_a = \frac{1}{\bar{w}_0} = \frac{J}{\pi \bar{a}} \quad (5)$$

Основной пропульсивной характеристикой движителя является его упор, представляющий собой проекцию сил гидродинамической природы F на направление движения аппарата F_x . Поскольку упор создаваемый лопастью ГЛД существенно изменяется во времени, удобно ввести понятие среднего упора за один период колебаний F_{x0} .

В качестве безразмерной пропульсивной характеристики введем понятие коэффициента нагрузки C_T :

$$C_T = 2 \frac{F_x}{\rho L H \cdot V_0^2} \quad (6)$$

и коэффициента упора лопасти ГЛД K_T :

$$K_T = \frac{F_x}{\rho a H \cdot (V_0 \bar{w}_0)^2} = \frac{J_a^2}{2 \bar{a}} C_T \quad (7)$$

Для характеристики эффективности спроектированного движителя необходимо определить его КПД: η . КПД движителей определяется в виде отношения полезной работы, совершенной движителем, к затраченной энергии S . Под полезной работой понимается произведение тяги движителя на перемещение в единицу времени [3], затраченная энергия S должна быть определена расчетным путем в рамках разрабатываемой математической модели. Таким образом, получаем:

$$\eta = \frac{F_{x0} V_0}{S} \quad (8)$$

Для того, чтобы определить силы, действующие на лопасти в рамках гипотезы плоских сечений, необходимо знать скорости обтекания профилей ее продольных сечений в разные моменты времени. Введем понятия мгновенных скоростей поступательного перемещения профиля $V_{и}$ и

вращения профиля $\omega_{и}$ (рис. 3), которые будем определять как производные от соответствующих характеристик движения профиля:

$$V_{и} = \dot{x} \cdot \vec{i}, \quad \omega_{и} = \dot{\beta} \quad (9)$$

где точкой сверху обозначены производные по времени

Тогда скорость потока, набегающего на профиль, в связанной с ним подвижной системе координат, можно представить следующим образом:

$$\vec{V} = -(V_0 + \dot{x}) \cdot \vec{i} \quad (10)$$

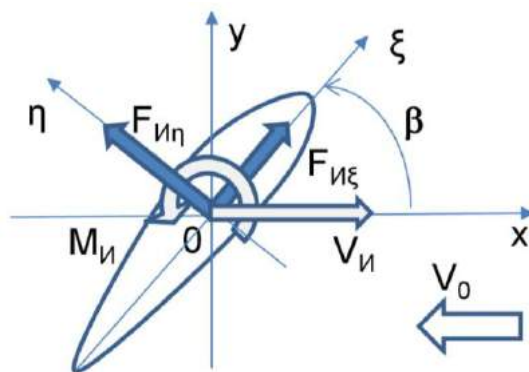


Рис. 3. Схема скоростей и сил, действующих на профиле лопасти ГЛД

Расчетная оценка характеристик профиля в рамках упрощенного метода может осуществляться с помощью метода описанного в [12]. Однако, этот метод неприменим для развитого отрывного обтекания профиля, в котором работают лопасти ГЛД при создании упора. На отрывных режимах для оценки сил на профиле предлагается использовать известное решение струйной теории. Согласно которой [13], для определения коэффициента нормальной силы, действующей на плоской пластине обтекаемой со срывом струй, может использоваться модифицированная формула Рэлея:

$$C_N = \frac{2\pi \sin \beta}{4 + \pi \sin \beta} (1 + \sigma) \quad (11)$$

где C_N – коэффициент нормальной силы, σ – коэффициент, учитывающий величину давления в застойной зоне.

Величина σ отличная от нуля может иметь место, если область отрывного течения не простирается до бесконечности, как это предполагается при выводе исходной формулы Рэлея, а замыкается на конечном расстоянии от профиля. Как показала практика [14], применение формулы (11) без специального выбора величины σ приводит к существенному занижению силы, в то время как характер зависимости силы от угла атаки прогнозируется с ее помощью правильно. Для получения практически приемлемой величины силы необходимо определить σ из условия согласования с экспериментом. В данном случае, из условия согласования с данными [15], предлагается определять σ следующим образом

$$\sigma = -\frac{1}{2} + \frac{1,6}{(9/\pi \cdot \beta)^{0,7}} \quad (12)$$

где угол β берется в радианах.

Поскольку отрывное обтекание крыла конечного размаха происходит иначе, чем отрывное обтекание плоского профиля, при малых удлинениях лопастей

следует использовать поправочный коэффициент k , аналогично тому, как это сделано в [14].

После определения коэффициента нормальной силы C_N , на его основе, согласно [13], можно определить коэффициент момента C_m , действующего на профиле (относительно середины хорды профиля):

$$C_m = \frac{3 \cos \beta}{4 + \pi \sin \beta} C_N \quad (13)$$

Таким образом, можно записать выражения для оценки сил и момента, действующих на профиле, при его квазистационарном движении со скоростью V , которая в общем случае будет меняться во времени:

$$F_{Cx} = \rho \frac{V^2}{2} L^2 \lambda_k \begin{cases} C_D(\beta), & \beta < \alpha_{kr} \\ C_N \sin \beta, & \beta \geq \alpha_{kr} \end{cases} \quad (14)$$

$$F_{Cy} = \rho \frac{V^2}{2} L^2 \lambda_k \begin{cases} C_L(\beta), & \beta < \alpha_{kr} \\ C_N \cos \beta, & \beta \geq \alpha_{kr} \end{cases}$$

где коэффициент k учитывает конечность размаха лопастей, C_D, C_L – коэффициенты сопротивления и подъемной силы, определяемые по методу [12], α_{kr} – критический угол атаки профиля.

Нестационарное движение тела в жидкости, как известно [16], приводит к действию на нем дополнительных инерционных сил и моментов гидродинамической природы, которые могут быть выражены следующим образом

$$\dot{F}_H = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{\omega}_H \times \dot{B} \quad (15)$$

$$\dot{M}_H = -\frac{\partial \vec{I}}{\partial t} - \vec{\omega}_H \times \dot{I} - \dot{V}_H \times \dot{B}$$

где \vec{B} – главный вектор системы мгновенных импульсов давлений, \vec{I} – главный момент системы мгновенных импульсов давлений относительно начала координат, ω_H – угловая скорость вращения тела относительно начала координат, V_H – скорость перемещения тела (начала координат подвижной системы координат, связанной с телом).

Эти силы и моменты с достаточной для практики точностью моделируются с помощью присоединенных масс.

Будем рассматривать движение плоского профиля в связанной с ним подвижной системе координат $O\xi\eta$ (рис. 3). Начало подвижной системы координат расположено посередине хорды этого профиля, ось $O\xi$ направлена вдоль хорды в носик профиля, а ось $O\eta$ перпендикулярно ей, образуя правую систему координат. При моделировании нестационарных сил можно пренебречь кривизной профиля и считать его симметричным. В этом случае нестационарное движение профиля в жидкости моделируется с помощью четырех коэффициентов присоединенных масс: $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}$. Остальные присоединенные массы равняются нулю [16]. Выражения (15) в этом случае могут быть записаны следующим образом:

$$F_{H\xi} = -\dot{V}_{H\xi} \cdot \lambda_{11} + \omega_H (V_{H\eta} \cdot \lambda_{22} + \omega_H \cdot \lambda_{26})$$

$$F_{H\eta} = -\dot{V}_{H\eta} \cdot \lambda_{22} - \dot{\omega}_H \cdot \lambda_{26} - V_{H\xi} \omega_H \cdot \lambda_{11}$$

$$M_H = -\dot{\omega}_H \cdot \lambda_{66} - \dot{V}_{H\eta} \cdot \lambda_{26} - V_{H\xi} (V_{H\eta} \cdot \lambda_{22} + \omega_H \cdot \lambda_{26}) + V_{H\xi} V_{H\eta} \cdot \lambda_{11} \quad (16)$$

где точка над переменными означает, как и ранее, производную по времени, коэффициенты ξ и η обозначают соответствующие компоненты скорости в подвижной системе координат $O\xi\eta$.

Входящие в выражение (16) переменные скорости могут быть представлены в виде зависимости от времени (9). Тогда, вычисляя вторые производные по времени, с учетом перехода в систему координат $O\xi\eta$, связанную с профилем, можно получить:

$$\vec{V}_H = -\dot{x} \cos \beta \cdot \vec{i}_\xi + \dot{x} \sin \beta \cdot \vec{i}_\eta$$

$$\dot{\vec{V}}_H = (\dot{x} \dot{\beta} \sin \beta - \ddot{x} \cos \beta) \vec{i}_\xi + (\dot{x} \dot{\beta} \cos \beta + \ddot{x} \sin \beta) \vec{i}_\eta \quad (17)$$

$$\omega_H = \dot{\beta}, \quad \dot{\omega}_H = \ddot{\beta}$$

Коэффициенты присоединенных масс, входящие в выражение (16), вычисляются по формулам, представленным в [16], для симметричного профиля Жуковского. В этом случае, параметром, учитывающим особенности геометрии профиля, является относительная толщина профиля e/L .

В окончательном виде силы и моменты, действующие на лопасти ГЛД, могут быть записаны в следующем виде:

$$F_x = F_{Cx} + F_{H\xi} \cdot \cos \beta - F_{H\eta} \cdot \sin \beta + m \cdot \dot{y} \dot{\beta}$$

$$F_y = F_{Cy} + F_{H\xi} \cdot \sin \beta + F_{H\eta} \cdot \cos \beta - m \cdot \ddot{y} - m \cdot V_{0\beta} \dot{\beta} \quad (18)$$

$$M = \rho \frac{V^2}{2} L^3 \lambda_k \cdot C_m + M_H - I \cdot \ddot{\beta}$$

где m – масса лопасти, I – момент инерции лопасти относительно середины хорды.

Будем считать, что аппарат обладает большой инерцией и скорость его движения не зависит от пульсирующего характера сил на движителе. Тогда, применительно к аппарату, можно рассматривать осредненные по времени характеристики движителя. Средний упор движителя может быть рассчитан в виде следующего интеграла по времени:

$$F_{x0} = \frac{1}{T} \int_0^T F_x dt \quad (19)$$

Для расчета затрат энергии на работу движителя необходимо вычислить следующий интеграл:

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T |F_x \cdot \dot{x}| dt \quad (20)$$

На основе величин (19) (20) можно определить КПД движителя ГЛД (8).

Тестирование упрощенной математической модели

Для верификации разработанной математической модели были использованы результаты CFD-моделирования работы гребной лопасти [7]. Расчеты выполнялись с помощью свободно распространяемого пакета программного обеспечения для проведения CFD-моделирования OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation) [17]. В рамках CFD-расчета для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$ SST. Для решения задачи был выбран нестационарный решатель overPimpleDyMFOam, использующий технологию *overset* для моделирования динамических сеток. Подвижная сетка состоит из треугольных элементов, и

подготовлена в пакете Pointwise. Неподвижная сетка построена с помощью утилиты blockMesh пакета OpenFOAM и состоит из прямоугольных элементов. Обе сетки объединялись в одну, с указанием подвижной и неподвижной зон (Рис. 4). Полученная в итоге расчетная сетка содержала около 1 млн. ячеек.

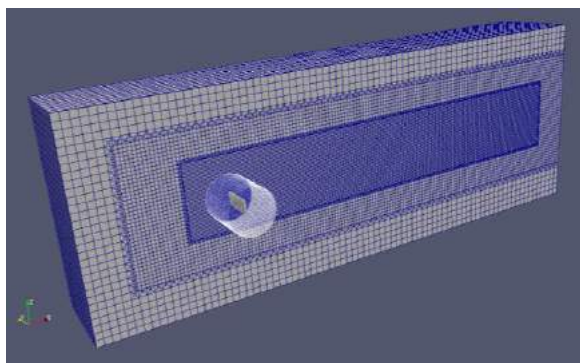


Рис. 4. Пример трехмерной сетки для CFD-расчета лопасти ГЛД.

В качестве объекта исследований была выбрана плоская лопатка имеющая сечение в форме профиля NACA0012. Таким образом, относительная толщина лопатки составляла 12%, а ее форма была асимметричной в продольном направлении. Исследования проводились при числе Рейнольдса

порядка $Re=1 \cdot 10^5$. Расчетное число Струхала $Sh=0,04$. Относительное удлинение лопасти $\lambda=3$. Относительный размах колебаний $a/L=20$.

Движение лопатки $x(t)$ задавалось по закону, обеспечивающему торможение лопатки в начале и конце гребка:

$$x = \frac{a}{2} \cdot (1 - \cos(2\pi \cdot t/T)) \quad (21)$$

где t – время.

Кроме того, лопасть поворачивалась, таким образом, чтобы встать вдоль потока в начале и конце гребка. Поворот осуществлялся по закону:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \left(1 - \frac{T}{L} x \right) \right] \quad (22)$$

Результаты сопоставления разработанной математической модели и CFD-расчета представлены на рис. 5. На рисунке приведены расчетные зависимости коэффициента нагрузки St на лопатке в зависимости от безразмерного времени t/T . Можно констатировать хорошее согласование закономерностей колебания упора во времени и его интегральных величин. В то же время, упрощенная методика не учитывает локальные пульсации упора, происходящие при движении крыла. Возникновение этих пульсаций, как было показано ранее [7], скорее всего, связано с периодическим сходом вихрей с лопасти при ее нестационарном движении.

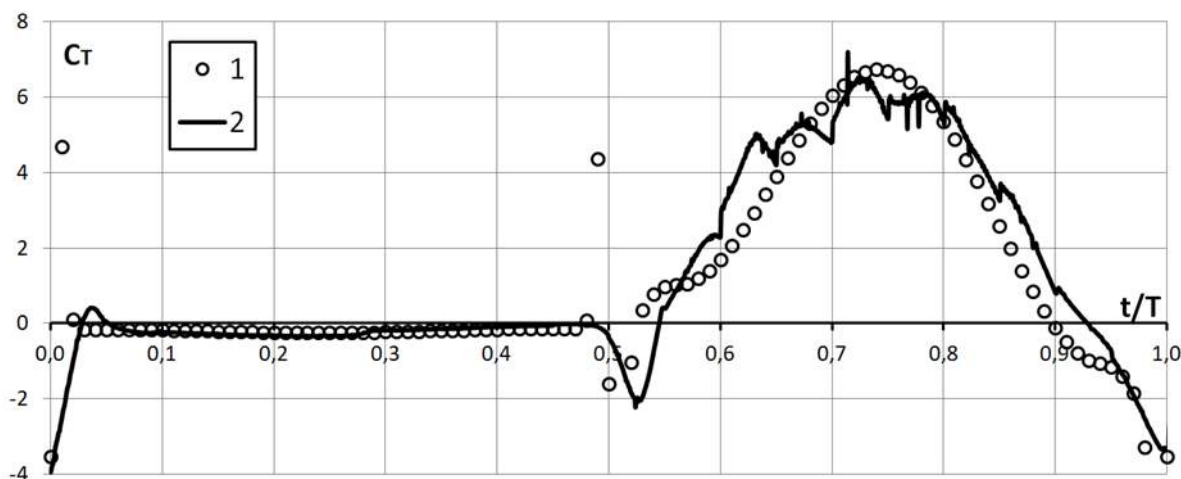


Рис. 5. Сопоставление расчета по представленной методике (1) и с помощью CFD-метода (2)

В целом можно считать, что разработанная методика показала достаточную точность прогнозирования пропульсивных характеристик ГЛД и может быть использована в дальнейшем при разработке данного типа движителя.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан упрощенный метод расчета гидродинамических характеристик гребного лопастного движителя, основанный на гипотезе плоских течений, теории присоединенных масс и эмпирических формулах. Метод был верифицирован путем сопоставления с результатами CFD-расчета

работы лопасти ГЛД. Показано, что разработанный метод позволяет с достаточной точностью моделировать механизм создания тяги движителем. В дальнейшем разработанный метод может быть использован при проектировании и оптимизации ГЛД.

В то же время можно констатировать, что сложные нестационарные процессы обнаруженные путем CFD-расчетов [7] с помощью упрощенного метода не моделируются. Для анализа нестационарных характеристик ГЛД необходимо привлечь CFD-моделирование или эксперимент.

Литература

1. Carlton J.S., Marine propellers and propulsion, Elsevier, Third edition, 2012
2. PPTC-smp11-workshop [Электронный ресурс] <https://www.sva-potsdam.de/en/pptc-smp11-workshop/>
3. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители, Л., Судостроение, 1988
4. Басин А.М. Основы теории и расчета судовых гребных колес, Л., М.: Речиздат, 1948.
5. Сатылбаев А.Б., Матисаков Т.К., Аттокуров А.К. Определение оптимального угла лопасти водяного колеса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки, №6, 2015, с. 413 – 416.
6. Якимов Н.М., Попов С.Д., Чувашев С.Н. Выбор геометрии эффективного высокоскоростного судового движителя на основе гребного колеса с учетом гидроаэродинамики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», №6, 2015, с. 50 – 58.
7. Чепурко С.И., Яковлев А.Ю. Численное исследование работы гребных лопаток // Морские интеллектуальные технологии, №3 том 1, 2021, с. 34 – 40.
8. Фальмонов Е.В. Колесный движительно-рулевой комплекс, патент РФ RU 2225327.
9. Соловьев Г.В., Киек В.А. Гребной гусеничный движитель для плавучего средства, патент РФ RU 2054360.
10. Береза П.И. Гребной гусеничный движитель, патент РФ RU 2537942.
11. Яковлев А.Ю., Чепурко С.И. Гребной лопастной движитель подводного аппарата, патент на полезную модель №209324.
12. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Полуэмпирический метод оценки характеристик гидродинамических профилей // Морские интеллектуальные технологии, № 4, т. 1, 2019, с. 29 – 33
13. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
14. Яковлев А.Ю. Метод расчета тянущей винто-рулевой колонки и его использование для решения практических задач // Морские интеллектуальные технологии, №4(42), т.1, 2018, с.83-89.
15. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям, М., Машиностроение, 1992
16. Короткин А.И. Присоединенные массы судна. Справочник, Л., Судостроение, 1986.
17. OpenFOAM [Электронный ресурс] <https://www.openfoam.com/>

References

1. Carlton J.S., Marine propellers and propulsion, Elsevier, Third edition, 2012
2. PPTC-smp11-workshop [Электронный ресурс] <https://www.sva-potsdam.de/en/pptc-smp11-workshop/>
3. Artjushkov L., Achkinadze A, Rusetsky A. Sudoviye dvizitely [Marine propulsors], Leningrad, izd. Sudostroenije, 1988.
4. Basin A., Osnovy teorii I rascheta sudovikh grebnykh koles [Theoretical base and calculation of wheel propulsor], Leningrad, Moscow, Rechizdat, 1948.
5. Satybaldyev A.B., Matisakov T.K., Attokurov A.K. Opredelenje optimalnogo ugla lopasty vodyanogo kolesa [Definition of the optimum angle of the blade of the water whell], International journal of applied and fundamental research. Technical sciences, No. 6, 2015, pp. 413 – 416
6. Yakimov N.M., Popov S.D., Chuvashhev S.N. Vybora geometriy effektivnogo vysokoskorostnogo sudovogo dvizitelja na osnove grebnogo kolesa s uchetom gydroaerodynamicy [Aerohydrodynamics based determination of geometry of a high-speed ship rowing wheel unit], Vestnik MGTU imeny Baumana [Harold of Bauman university], No. 6, 2015, pp. 50 – 58.
7. Chepurko S.I., Yakovlev A.Yu. Chislennoje issledovanije raboty grebnykh lopatok [Numerical modeling of paddling blades activity], Marine intellectual technology, No. 3, vol.1, 2021, pp. 34 – 40
8. Fal'monov E. Kolesny dvizitelno-rulevoy kompleks [Wheel propulsion and steering system], Patent of Russian Federation, RU 2225327.
9. Solov'ev G., Kiek V. Grebnoy gusenichny dvizitel llja plavuchego sredstva [Paddling caterpillar propulsor for whater veacles], Patent of Russian Federation, RU 2054360.
10. Bereza P.I. Grebnoy gusenichny dvizitel [Paddling caterpillar propulsor], Patent of Russian Federation RU2537942.
11. Yakovlev A.Yu., Chepurko S.I. Grebnoy lopastnoy dvizitel podvodnogo apparata [Paddling blades propulsor for underwater veycles], Patent of Russian Federation No.209324.
12. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Poluempirichesky method otsenky harakteristik gidrodinamicheskikh profilej [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections characteristics], Marine intellectual technology, 4(46), vol.1, 2019, pp. 29 – 33
13. Gurevich M.I. Teorija struy idealnoy zidkosti [Jet theory of ideal fluid], Moscow, izd. Nauka, 1979.
14. Yakovlev A.Yu. Metod rascheta tyanuschey vinto-rulevoy kolonky I ego ispolzovanije dlja reshenja practicheskikh zadach [Calculation method of podded propulsor characteristics and its application for the practical tasks], Marine intellectual technologies, No.4, vol.1, 2018, pp. 83 – 89.
15. Idelchik I. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Handbook of hydraulic resistances], Moscow, izd. Mashinostroenye, 1992
16. Korotkin A.I. Prisoedynennyje massy sudna. Spravochnik [Added masses of ships. Handbook], Leningrad, izd. Sudostroenije, 1986.
17. OpenFOAM <https://www.openfoam.com/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Сергей Иванович Чепурко, старший преподаватель кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Sergey I. Chepurko, Senior teacher of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.05.2022.

Научная статья

УДК 629.12:539.433

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.041>

Оценка влияния на параметры вибрации валопровода силы упора вращающегося винта

Д.В. Гежа¹ dasha.gezha@yandex.ru, А.Л. Мелконян¹ mel1950@mail.ru, Д.А. Николаев¹ d.nikolaev@d-nik.de

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Для получения математической модели поставленной задачи использован разработанный авторами метод коррекции инерционно-жесткостных характеристик модели и внешней нагрузки. При реализации метода учет влияния дополнительных факторов, усложняющих картину вибрации (учет вращения винта и квазистатической силы его упора), осуществляется при расчете параметров вибрации квазиодномерной модели автоматически.

Для созданной математической модели разработан алгоритм расчета параметров вибрации (на основе дискретного варианта метода парциальных откликов). Выведены формулы для парциальных откликов и парциальных параметров, необходимые при реализации предложенного алгоритма. Разработана соответствующая программа расчета параметров вибрации (амплитудные значения смещений, внутренних усилий и опорных реакций). Выполнена серия расчетов, позволивших оценить влияние вращения винта и силы его упора на параметры вибрации и собственные частоты валопровода реального объекта.

Ключевые слова: квазиодномерная модель, инерционно-жесткостные характеристики, парциальные отклики, параметры вибрации, вращение винта.

Благодарности: авторы выражают благодарность профессору СПбГМТУ Олегу Анатольевичу Хализеву за предоставление части исходных данных

Для цитирования: Гежа Д.В., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Оценка влияния на параметры вибрации валопровода силы упора вращающегося винта, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 53—58.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.041>

Evaluation of the impact on the vibration parameters of the shafting of the stop force of the rotating propeller

Daria V. Gezha¹ dasha.gezha@yandex.ru, Armen L. Melkonian¹ mel1950@mail.ru, Dmitri A. Nikolaev¹

d.nikolaev@d-nik.de

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

Abstract. The method for correction of inertia-stiffness characteristics of a model and external load, which was designed by the authors, is used to obtain the mathematical model for the given problem. Additional factors, that complicate the vibration picture (the propeller rotation and its quasi-static stop force), are taken into account automatically while the method is implemented for calculation of vibration parameters of a quasi-one-dimensional model.

The calculation algorithm for vibration parameters (based on the discrete version of the partial responses method) was developed for the created mathematical model. Formulas for partial responses and partial parameters, necessary for the implementation of the proposed algorithm, were derived. The corresponding program for calculation of vibration parameters (the amplitudes of displacements, internal forces and support reactions) was developed. A series of calculations, which allow to evaluate the impact of the propeller rotation and its stop force on the vibration parameters and own frequencies of a ship shafting of a real object, were performed.

Keywords: quasi-one-dimensional model, inertia-stiffness characteristics, partial responses, vibration parameters, propeller rotation.

Acknowledgments: The authors would like to thank Prof. Oleg Anatolyevich Khalizev of St. Petersburg State Medical Technical University for providing the part of initial data

For citation: Daria V. Gezha, Armen L. Melkonian, Dmitri A. Nikolaev Evaluation of the impact on the vibration parameters of the shafting of the stop force of the rotating propeller, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 53—58.

Введение

Вибрация кормовой оконечности судна в результате действия периодических усилий, передающихся корпусу со стороны вращающегося винта – один из основных факторов, обуславливающих как общую вибрацию корпуса судна в целом, так и местную вибрацию некоторых

судовых конструкций. Действие вибрации снижает надежность работы приборов и комплексов вооружения, условия обитаемости личного состава, а также прочностные характеристики элементов конструкций (с их последующим разрушением). В силу сложности задачи определения параметров вибрации валопровода при учете вращения гребного винта, на данный момент в литературе практически

отсутствуют ее аналитические решения либо авторы ограничиваются рассмотрением наиболее простых частных случаев и приведением приближенных зависимостей. Большинство существующих учебников, методических материалов, справочной литературы по данной теме посвящено нахождению собственных частот валопровода, поскольку отражает общепринятый подход борьбы с вибрацией, суть которого в исключении совпадения частот вынуждающего воздействия с любой из частот собственных колебаний конструкции. Однако уже долгие годы санитарные нормы вибрации предъявляют требования к амплитудам смещений и ускорений, а для анализа прочностных характеристик необходимо знание внутренних усилий и опорных реакций. В последнее время подобного типа задачи решаются с помощью метода конечных элементов [1, 2], применение которого требует наличия дорожки универсальных программ, вычислительной техники высокого уровня и серьезной подготовки исходных данных. Привлекают внимание в аспекте проблематики нашего исследования несколько научных статей наиболее близких по теме: [4], [6] и [12]. В вышеизложенных статьях приводится нахождение собственных частот, однако их определение сопряжено с существенными трудностями вычислительного характера. Значения параметров вибрации не приводятся ни в одном из источников. Получение возможности выполнить расчеты этих параметров достаточно быстро на вычислительной технике обычного уровня делает настоящую работу достаточно актуальной.

Постановка задачи, разработка математической модели и алгоритма расчета

Рассматривается следующая постановка задачи: получение параметров вибрации (распределение вдоль оси валопровода амплитуд линейных и угловых смещений, внутренних усилий и опорных реакций) при решении задачи об установившихся вынужденных колебаниях судового валопровода, оснащенного гребным винтом, вращающимся с постоянной угловой скоростью Ω .

Для достаточно жестких валов (надводные корабли, подводные лодки и т.п.) в расчетах вибрации общепринята модель в виде непризматической балки; при этом нейтральная ось такой модели совершает установившиеся колебания с частотой вынуждающего воздействия ω относительно своего начального положения; в общем случае указанные частоты могут не совпадать.

Будем полагать движение валопровода сложным, состоящим из относительного движения (вращение конструкции с угловой скоростью Ω вокруг своей нейтральной оси) и переносного движения (установившиеся колебания с частотой ω вместе с нейтральной осью относительно ее начального положения). Для перехода к квазистатической постановке задачи воспользуемся методом кинестатики, добавив к внешним силам, действующим на элементы конструкции, силы инерции переносного движения, силы инерции относительного движения и силы инерции Кориолиса.

В наиболее распространенном случае, когда поперечное сечение валопровода представляет собой совокупность концентрических окружностей, имеют место две особенности, существенно упрощающие решение задачи. Первая из них, обусловленная совпадением центров инерции и жесткости поперечных сечений, приводит к отсутствию инерционных нагрузок относительного движения, а вторая, обусловленная одинаковой жесткостью на изгиб в любом направлении – позволяет искать параметры движения в неподвижной (не вращающейся) координатной системе. Если усилиями, вызывающими вибрацию, являются инерционные усилия, обусловленные неуравновешенностью гребного винта (поворачивающаяся с постоянной угловой скоростью Ω вокруг нейтральной оси сила $Q_0 = m\Omega^2 e$, где m – масса винта, а e – ее эксцентриситет, и изгибающий момент $M = I_0\Omega^2$, обусловленный центробежным моментом инерции I_0), то их действие может быть учтено по [8] коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к квазистатической модели. В неподвижной координатной системе действие такой силы [1, 13] эквивалентно приложению комплексной силы $\bar{Q} = Q_0 \sin \Omega t + iQ_0 \cos \Omega t$, где $i = \sqrt{-1}$; действие изгибающего момента учитывается аналогично. Для выполнения такого расчета можно воспользоваться моделью и программой из [15].

Если на модель дополнительно действуют заданные усилия, гармонически изменяющиеся во времени с частотой ω , то решение задачи будет представлять собой суперпозицию решений. Первое из них должно учитывать силы, возникающие вследствие неуравновешенности гребного винта (алгоритм решения предложен выше), а второе – действие на элементы модели задаваемой нагрузки, сил инерции переносного движения (происходящего вместе с нейтральной осью модели) и сил инерции Кориолиса. Заметим, что действие на элементы модели нагрузки первых двух типов может быть учтено при непосредственном использовании модели и программы из [15]. Автоматический учет действия сил инерции Кориолиса, вызывающих возникновение гироскопических моментов, потребует некоторой модификации используемой ранее модели (т.е. ее оснащение дополнительными свойствами).

Перейдем к разработке математической модели задачи

Для конструкций, обладающих существенно большей протяженностью вдоль некоторой оси, при расчете параметров вибрации удобно воспользоваться квазиодномерной моделью в виде последовательно соединенных однотипных конечных элементов. Такое представление гораздо удобнее при анализе установившихся колебаний, так как оно позволяет перейти к квазистатическому варианту модели [1, 7, 13, 15]. В таком случае наша модель представляет собой совокупность абсолютно твердых и безынерционных элементов, соединенных между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры (пропорциональные

смещению, скорости, ускорению). При условии зависимости усилия от скорости характеристики жёсткости будут являться комплексными числами [1, 7, 13, 15]. В частном случае, когда частота колебаний равна нулю, имеет место статический расчет параметров деформирования квазиодномерной модели.

Для учета дополнительных факторов, усложняющих картину установившихся колебаний квазиодномерной модели, можно применить следующий подход из [8]: проанализировать влияние данного фактора на модель (т.е. понять структуру дополнительных усилий); при этом дополнительные усилия условно разделить на три группы:

- к первой группе отнести слагаемые, которые можно учесть коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к квазистатической модели;
- ко второй группе отнести слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным и (или) относительным смещениям, скоростям и ускорениям. Действие слагаемых этой группы учесть коррекцией инерционно-жесткостных характеристик модели (либо ее модификацией, введя в нее дополнительные упругие связи);
- к третьей группе отнести слагаемые, структура которых не может быть учтена модификацией квазиодномерной модели.

Заметим, что при реализации такого подхода, влияние слагаемых первой группы (усилия от статической и моментной неуравновешенности винта) были оценены в рамках модели из [15], а второй (силы инерции переносного движения и моменты гироскопической природы) - выполняется автоматически при расчете параметров вибрации модифицированной модели. При наличии слагаемых третьей группы следует воспользоваться методом последовательных приближений.

Для разработки алгоритма решения задачи был применен дискретный вариант предложенного В. С. Чуиковским в [13] метода парциальных откликов. Основная идея этого метода заключается в том, что рассматриваемая модель разделяется сечением на две парциальные системы (ПС), для которых составляют уравнения совместности деформаций; эти деформации для каждой из ПС записываются в виде суммы парциальных параметров (ПП) (ПП - деформации, обусловленные внешней нагрузкой) и произведения квадратной матрицы парциальных откликов (ПО) на матрицу-столбец неизвестных внутренних усилий. Решение системы этих уравнений позволяет сначала найти внутренние усилия в сечении, а потом – смещения любой из ПС. Такой прием позволяет вместо решения краевой задачи для общей модели искать общее решение двух задач с начальными условиями. Поскольку формулы для ПО и ПП при наращивании ПС на очередной элемент дискретной модели носят рекуррентный характер, а выбор в качестве ПО податливостей сохраняет причинно - следственные связи в рассматриваемом процессе (усилия – причины, смещения – следствия), расчеты выполняются достаточно быстро и устойчивость счета должна соответствовать устойчивости моделируемого процесса [13].

Действие на квазиодномерную модель постоянной по величине продольной сжимающей силы было выполнено по формулам из [9, 10],

полученных на более раннем этапе; примененный в этих работах подход состоял в учете действия дополнительно возникающих усилий при выводе формул для парциальных откликов и парциальных параметров.

Программа и результаты расчета

Программа расчёта «Винт» представляет собой модификацию созданной ранее программы «Rahmen» [15]. Новая программа позволяет быстро и наглядно (используются привычные при расчёте балок графические представления) подготовить и провести расчёт параметров вибрации непризматической балки с учетом вращения одного из ее элементов - гребного винта. Визуальная составляющая программы складывается из трёх окон: 1-ое: главное окно; 2-ое: окно изменения параметров и ввода; 3-е: числовой и графический вывод результатов.

Главное окно программы «Винт» (рисунок №2) содержит изображение расчётной схемы, строку редактирования (ввода) частоты вынуждающего воздействия, отдельно выделенные численные значения всех варьируемых параметров валопровода.

В качестве исследуемой конструкции был выбран один из 2-х валопроводов подводной лодки проекта 633 со следующими характеристиками: $V_{\max\text{подвод}}=21$ узел; $V_{\max\text{надвод}}=10$ узлов. Два двухтактных дизеля марки 37Д мощностью по 2 000 л.с. каждый; 2 электродвигателя ПП-101 мощностью по 4000 л.с. каждый (при 1350 л.с. дают 420 об/мин = 44 рад/сек; при 4000 л.с. дают 600 об/мин = 63 рад/сек); 2 электродвигателя экономического хода, нереверсивные, мощностью по 50 л.с. каждый. Винты бронзовые в насадках, 4-х лопастные, диаметром $D=1600$ мм.

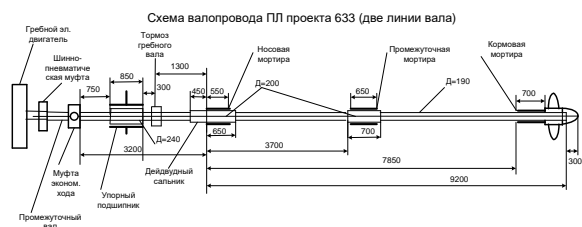


Рис.1 Схематическое изображение модели валопровода.

По результатам предварительных расчетов были также получены данные: осевой момент инерции винта, $I=50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; масса винта, $m = 591 \text{ кг}$.

Принятые ограничения: диапазон частот вынуждающего воздействия ω (0 – 255 рад/сек) ограничивается максимальным значением лопастной частоты (y винта 4 лопасти); диапазон частот вращения винта Ω (0 – 63 рад/сек) ограничивается максимальным числом оборотов гребного вала в минуту); сила инерции от статической неуравновешенности равна 0.01 веса винта.

Серия расчетов без учета вращения винта.

На первом этапе были найдены значения первых двух собственных частот изгибных колебаний валопровода с невращающимся винтом. Поскольку программа для расчета параметров вибрации не позволяет непосредственно вычислять собственные

частоты конструкции, их определение, тем не менее, может быть выполнено по известной особенности - когда частота вынуждающего воздействия будет переходить через значение собственной частоты валопровода, смещение будет менять знак на противоположный, т.к. произойдет изменение фазы колебаний (т.е. при переходе через частоту резонанса прогиб меняет свой знак, обращаясь в перегиб и (или) наоборот). Эту особенность можно заметить, сравнив значения амплитуд смещений на рисунках 2 и 3, при частотах $\omega=131$ [рад/сек] и $\omega=132$ [рад/сек] соответственно. В итоге значение первой собственной частоты λ_1 валопровода можно принять равной $\sim 131,4$ [рад/сек].



Рис. 2 Распределение поперечного смещения вдоль оси валопровода при $\omega=131$ [рад/сек].

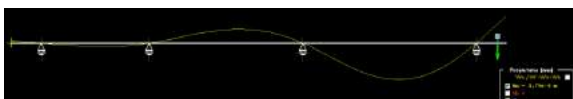


Рис. 3 Распределение поперечного смещения вдоль оси валопровода при $\omega=132$ [рад/сек].

Подобным образом находим значение второй собственной частоты валопровода; значение второй собственной частоты λ_2 валопровода можно принять равной $\sim 237,5$ [рад/сек].

Серия расчетов с учетом вращения винта.

Выполнив серию расчетов с учетом введенных ограничений на диапазон частот вращения винта Ω (0 – 63 рад/сек), была построена диаграмма Кэмпбелла. Она показывает зависимость частот собственных изгибных колебаний валопровода от скорости вращения винта. Для первой формы колебаний построим такие зависимости, одна из которых соответствует прямой, а другая — обратной прецессиям винта. Также нанесем зависимости частоты возбуждающей силы от скорости вращения винта: первая прямая (4) $\omega=\Omega$, вторая прямая (5) $\omega=4*\Omega$ (у винта 4 лопасти). Точки пересечения этих линий с линиями собственных частот дают значения критических скоростей (Рис.4).

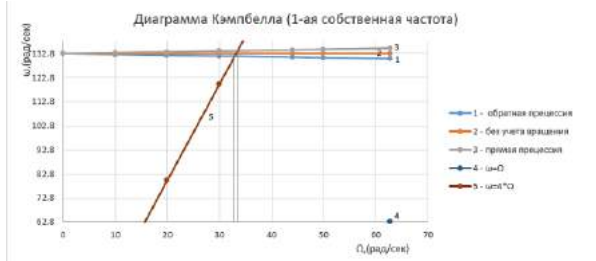


Рис. 4 Диаграмма Кэмпбелла: 1 — обратная прецессия; 2 — первая частота собственных колебаний без учета вращения винта; 3 — прямая прецессия; 4 — частота возбуждающей силы $\omega=\Omega$; 5 — частота возбуждающей силы $\omega=4*\Omega$.

Критические скорости вращения 4-х лопастного винта, определенные по диаграмме, составляют

32.92 рад/с (314.4 об/мин) для обратной прецессии, 33.5 рад/с (319.9 об/мин) — для прямой.

Выводы: 1) Найдены значения первых двух критических частот; 2) Влияние вращения винта оказалось незначительным (причина - вращение валопровода сравнительно низкооборотное, а сам валопровод обладает достаточно большой жесткостью на изгиб).

Серия расчетов с учетом силы упора винта.

При движении подводной лодки с постоянной скоростью сила упора гребного винта должна быть равна силе буксировочного сопротивления подводной лодки. В результате расчетов по приближенной формуле из [14] для силы сопротивления $T = C_x \frac{\rho V^2}{2} D^{2/3}$, где $C_x=0.05$ (эмпирический коэффициент для подводной лодки штевневой формы), ρ - плотность воды, V - скорость движения подводной лодки, D - ее водоизмещение, была получена зависимость (см. Рис. 5) силы упора винта от частоты его вращения.

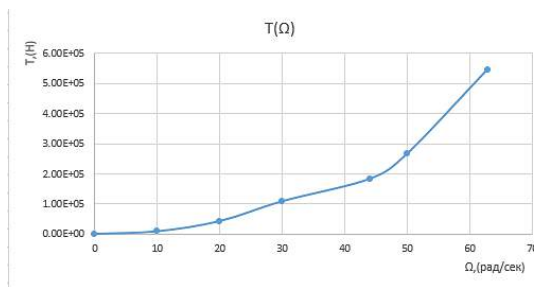


Рис. 5 Зависимость силы упора винта от частоты его вращения.

С учетом влияния силы упора винта была вновь построена диаграмма Кэмпбелла (см. Рис. 6).

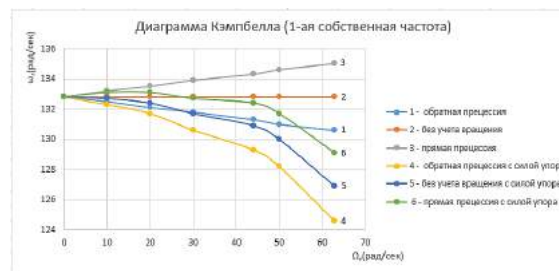


Рис. 6 Диаграмма Кэмпбелла: 1 — обратная прецессия; 2 — первая частота собственных колебаний без учета вращения винта; 3 — прямая прецессия; 4 — обратная прецессия с учетом силы упора винта; 5 — без учета вращения винта, но с учетом силы его упора; 6 — прямая прецессия с учетом силы упора винта.

Из диаграммы видно (Рис. 6), что влияние силы упора винта существенно снижает собственную частоту колебаний.

Оценка влияния силы упора на параметры вибрации.

Для анализа влияния этого фактора на амплитуду поперечного смещения выбрана характерная точка в середине самого длинного, третьего, пролета (в

сечении при $x=9.724\text{м}$); результаты расчета приведены на Рис.7. Влияние силы упора винта на амплитуду поперечной опорной реакции на ближайшей к винту опоре (в сечении при $x=12.063\text{м}$) приведено на Рис.8. При выполнении расчетов частота изменения вынуждающего воздействия была принята равной частоте вращения винта.

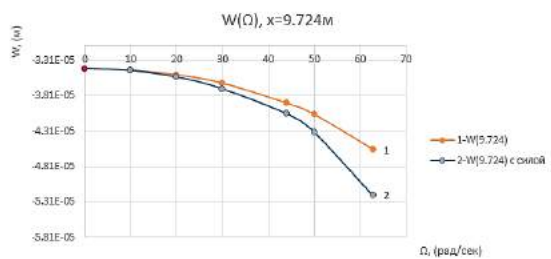


Рис.7 Зависимость амплитуды поперечного смещения от частоты вращения винта в середине самого длинного пролета ($x=9.724\text{м}$); 1- без учета силы упора; 2- с учетом силы упора винта.

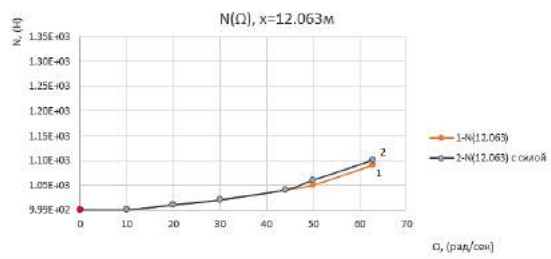


Рис.8 Зависимость амплитуды поперечной опорной реакции от частоты вращения винта на концевой опоре ($x=12.063\text{м}$); 1- без учета силы упора; 2- с учетом силы упора винта.

Анализ полученных зависимостей показывает, что учет вращения винта привел к увеличению амплитуд вибрации в выбранной точке до 35%, а с учетом силы упора винта – к увеличению амплитуд вибрации до 52%. В то же время влияние вращения винта и силы его упора на амплитудное значение опорной реакции не превысило 10%. На взгляд авторов, последний результат есть следствие того, что максимальная сила упора, принятая в расчетах, на два порядка меньше значения критической силы, при которой должна иметь место потеря устойчивости наиболее протяженного пролета валопровода.

Заметим, что при выполнении расчетов на критических скоростях при отсутствии внешних и внутренних сопротивлений значения параметров вибрации возрастают на несколько порядков. Поэтому при необходимости корректного расчета параметров вибрации на этих режимах следует задать коэффициенты внешнего и внутреннего демпфирования (их получают из эксперимента либо анализа движения прототипа).

Выводы: 1) Для рассмотренного валопровода при определении критических скоростей учет вращения винта пренебречь можно, а учетом силы упора винта – нельзя; 2) При нахождении амплитуд вибрации не учет вращения и силы упора винта может приводить к существенным ошибкам.

Заключение

Разработаны модель, алгоритм и программа расчета параметров вибрации судового валопровода, позволяющие учитывать вращение гребного винта, а также силу его упора. По разработанной программе для реального объекта выполнено исследование расчетного характера, позволившее оценить влияние учета вращения и силы упора винта на параметры его вибрации и собственные частоты изгибных колебаний.

Литература

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. СПб.: Мор Вест, 2005, 421 с.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1972, 415 с.
3. Давыдов В.В., Маттес Н.В. Динамические расчеты прочности судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974, 336 с.
4. Гризодубов В.Б., Манухин В.А. Решение задач роторной динамики в ANSYS. СПб, Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, №1, стр.50-58, 2014
5. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1959, 248 с.
6. Мартыанов В. В. Расчет крутильных колебаний судового валопровода прогулочного пассажирского теплохода «Эридан» ПР. Р19-1, СПб, Вестник «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», №4(32), стр. 146-153, 2015
7. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования. СПб, Моринтех, №2(44)Т.1, стр.45-51, 2019
8. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Модификация инерционно-жесткостных характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях. СПб, Моринтех, №1(47) Т.3, стр.12-19, 2020
9. Мелконян А.Л. Математическая модель для исследования связанных изгибно-продольных вынужденных колебаний плоско-криволинейной упругой конструкции при наличии статической продольной нагрузки. депонировано ВИНТИ 7692-В87, 12 стр., 02.11.1987
10. Мелконян А.Л. Алгоритм расчета связанных изгибно-продольных вынужденных установившихся колебаний плоско-криволинейной упругой дискретной системы при наличии статической продольной нагрузки. депонировано ВИНТИ 367-В88, 14 стр., 15.01.1988
11. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974, 344 с.
12. Сутырин В.И., Шинкаренко И.А. Расчет крутильных колебаний судового валопровода буксира проекта 1606. Калининград, Известия КГТУ, №49, стр. 261-272, 2018
13. Чувиковский В.С. Численные методы расчетов в строительной механике корабля Л.: Судостроение, 1976, 374 с.

14. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки, Л.: Судостроение, часть 1, 1970, 352 с.
15. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Эффективное решение. Расчет изогнутых балок и рам.). 30.03.2022

References

1. Alexandrov V.L., Matlakh A.P., Polyakov V.I. Borba s vibratsiyey na sudah [Vibration control on ships], SPb, MorVest, 2005, s.421
2. Biderman V.L. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Applied theory of mechanical vibrations] M.: Visshaya shkola, 1972, 415 s.
3. Davidov V.V., Mattes N.V. Dinamicheskie rascheti prochnosti sudovix konstruksiy [Dynamic strength calculations of ship structures], L.: Sudostroenie, 1974, 336 s.
4. Grizodubov V.B., Manukhin V.A. Solving problems of rotor dynamics in ANSYS. St. Petersburg, Proceedings of the St. Petersburg State Marine Technical University, No. 1, pp. 50-58, 2014
5. Dimentberg F.M. Izgibnie kolebaniya vraschayuschixsya valov [Bending vibrations of rotating shafts], M.: AN SSSR, 1959, 248 s.
6. Mart'yanov V.V. Calculation of torsional vibrations of the ship's shafting of the pleasure passenger motor ship "Eridan" PR. R19-1, St. Petersburg, Vestnik "GUMRF named after Admiral S. O. Makarov", No. 4 (32), pp. 146-153, 2015
7. Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Kvaziodnomernie modeli dlia analiza parametrov vibratsii sudovogo korpusa na rannih stadiyah ego proektirovaniya [Quasi-one-dimensional models for the analysis of ship hull vibration parameters at early stages of its design], SPb, Morintex, №2(44) T.1, s. 44-51, 2019
8. Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Modifikatsiya inertsionno-gestkostnih harakteristik modeli kak put resheniya zadach o ee ustanovivshisya kolebaniyah [Modification of the inertial-stiffness characteristics of the model as a way to solve problem of its steady-state oscillation]. SPb, Morintex, №1(47) T.3, s. 12-20, 2020
9. Melkonian A.L. Matematicheskaya model dlia issledovaniy svyazannykh izgibno-prodolnykh vinugdennykh kolebaniy plosko-krivolinyeynoy uprugoy konstruksii pri nalichii staticheskoy prodolnoy nagruzki [Mathematical model for the study of coupled flexural-longitudinal forced vibrations of a plane-curvilinear elastic structure in the presence of a static longitudinal load], VINITI 7692-V87, s. 12, 02.11.1987
10. Melkonian A.L. Algoritm rascheta svyazannykh izgibno-prodolnykh vinugdennykh kolebaniy plosko-krivolinyeynoy uprugoy konstruksii pri nalichii staticheskoy prodolnoy nagruzki [Algorithm for calculating coupled flexural-longitudinal forced steady oscillations of a plane-curvilinear elastic discrete system in the presence of a static longitudinal load], VINITI 367-V88, s. 14, 15.01.1988
11. Postnov V.A., Xarkhurim I. Y. Metod konechnix elementov v raschetax sudovix konstruksiy [Finite element method in calculations of ship structures], L.: Sudostroenie, 1974, 344 s.
12. Sutyryn V.I., Shinkarenko I.A. Calculation of torsional vibrations of the ship shafting of the tug of project 1606. Kaliningrad, Izvestiya KSTU, No. 49, pp. 261-272, 2018
13. Chuvikovskiy V.S. Chislennye metody raschetov v stroitelnoy mekhanike korabliia. [Numerical Methods of Calculations in the Structural Mechanics of a Ship], L, Sudostroenie, 1976, 374 s.
14. Rogdestvenskiy V.V. Dinamika podvodnoy lodki [Submarine dynamics], L, Sudostroenie, 1970, s. 352
15. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Effective solution. Calculation of curved beams and frames). 30.03.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дарья Викторовна Гежа, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, тел. (904) 515-92-87, e-mail: dasha.gezha@eandex.ru

Dariya V. Gezha, bachelor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190008 St. Petersburg, The Russian Federation, phone number (904) 515-92-87, e-mail: dasha.gezha@eandex.ru

Армен Левонович Мелконян, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, тел. (911) 911-64-25; e-mail: mel1950@mail.ru

Armen L. Melkonian, Ph.D.(Eng), professor, professor of theoretical mechanics and material strength department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190121 St. Petersburg, The Russian Federation, phone number (911) 911-64-25, e-mail: mel1950@mail.ru

Дмитрий Александрович Николаев, кандидат технических наук, пенсионер, e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

Dmitry A. Nikolaev, Ph.D.(Eng), a pensioner e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.04.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.05.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 26.05.2022.

Научная статья

УДК 532.5:001.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.042>

Оценка сопротивления вспомогательного судна внутреннего плавания приближёнными методами

Е.Ю. Чебан¹ egor.cheban.2@gmail.com, Д.В. Никущенко² Research@smtu.ru,

О.В. Мартемьянова¹ dovnn@yandex.ru, Е.А. Лукина¹ evair@yandex.ru,

М.Ю. Тихобаев¹ mihailtikhobaev913@gmail.com

¹Волжский государственный университет водного транспорта, ² Санкт-Петербургский морской технический университет

Аннотация. Представлены результаты сравнения расчётов сопротивления приближенными параметрическими и численными методами. Рассчитано сопротивление воды движению речного служебного судна. Используются параметрические методы G. van Oortmerssen, DeGroot RB, Holtrop, реализованные в программных продуктах FreeShip и NavCad. Для численного моделирования использовался программный комплекс вычислительной гидродинамики FineMarine™. По сравнению с результатами численного моделирования, расчеты в программе FreeShip методом van Oortmerssen показывают достаточное совпадение при $Fr > 0,29$, в то время как NavCad этот же метод в диапазоне Fr от 0,29 до 0,41 показывает отличие от 0 до 40 процентов. Метод DE Groot RB в диапазоне $Fr = 0,24 \dots 0,36$ показывает большую ошибку, занижая сопротивление на 14...26%, и завышает результат при $Fr = 0,41$ до 20%. Сделан вывод о необходимости разработки специального параметрического метода оценки сопротивления для судов вспомогательного флота внутреннего плавания с небольшими отношениями L/B и B/T.

Ключевые слова: модельный эксперимент, параметрические методы, пределы применимости, вычислительная гидродинамика, прогнозирование сопротивления.

Для цитирования: Чебан Е.Ю., Никущенко Д.В., Мартемьянова О.В., Лукина Е.А., Тихобаев М.Ю. Оценка сопротивления вспомогательного судна внутреннего плавания приближёнными методами. 2022. № 2 часть 2. С. 59—65.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.042>

Study of the service vessel's hydrodynamic characteristics by approximate methods

Egor Yu. Cheban¹ egor.cheban.2@gmail.com, Dmitry V. Nikushchenko² Research@smtu.ru,

Olga V. Martmianova¹ dovnn@yandex.ru, Evgeniya A. Lukina¹ evair@yandex.ru,

Michael Yu. Tikhobaev¹ mihailtikhobaev913@gmail.com

¹ Volga state university of water transport, ² St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The comparison results for parametric and numerical methods of ships resistance prediction are given. The water resistance to the movement of a river service vessel was calculated by the parametric methods of G. van Oortmerssen, DeGroot RB, Holtrop, implemented in the FreeShip and NavCad software products. For numerical modeling, the FineMarine™ CAB-code was used. Compared with the results of numerical simulations, the calculations results FreeShip using the van Oortmerssen method show sufficient agreement at $Fr > 0.29$, while the NavCad method in the Fr range from 0.29 to 0.41 shows a difference from 0 to 40 percent. DE Groot RB method in the range $Fr = 0.24 \dots 0.36$ shows a larger error, underestimating the resistance by 14 ... 26%, and overestimates the result at $Fr = 0.41$ to 20%. In general, the work shows that for technical fleet ships of the inland navigation with small L/B and B/T ratios, it is advisable to develop a special parametric method for determining resistance, based on the results of model and field tests, as well as numerical modeling.

Keywords: towing test tank, experimental modeling, CFD, resistance prediction, G. van Oortmerssen, DeGroot RB, Holtrop.

For citation: E.Yu. Cheban, D.V. Nikushchenko, O.V. Martmianova, E.A. Lukina, M.Yu. Tikhobaev. Study of the service vessel's hydrodynamic characteristics by approximate methods. 2022. № 2 part 2. P. 59—65.

Введение

Одними из наиболее сложных вопросов на начальном этапе проектирования судов являются: определение их главных размеров, сопротивления и, соответственно, проектной скорости. Обычно для этого используются параметрические методы, основанные на статистических данных, модельные испытания в опытовых бассейнах и численное моделирование (CFD).

Модельные эксперименты являются классическим и общепринятым способом получения гидродинамических характеристик (ГДХ) судов, однако достаточно дорогостоящи, занимают много времени ввиду необходимости изготовления большого количества моделей. Для соблюдения гидродинамического подобия сложность представляет обеспечение масштаба турбулентности, зависящего от взаимосвязи обводов судна и скорости движения. Параметрические

методы основаны на статистической обработке большого числа результатов модельных и (или) натурных испытаний. Недостатком таких методов является ограниченная применимость даже в пределах судов сходных типов и размеров, что может привести к ошибкам при определении сопротивления. [1]. Более точные результаты могут быть получены с помощью численного моделирования на основе решений уравнений движения жидкости [2-4]. Несмотря на то, что численное моделирование является приближенным методом, современные программные продукты позволяют получать результаты с достаточной точностью 2–5% [2-4]. В том числе информацию о распределении давления по поверхности корпуса, силы, моменты и т.д., что важно для отработки обводов корпуса в процессе проектирования [5].

В то же время численное моделирование занимает значительное время даже при использовании суперкомпьютеров. Как показывает опыт проектирования, целесообразно использовать все возможные методы определения ГДХ на различных этапах проектирования. В этом случае на начальных этапах может быть задан диапазон изменения главных размерений судна, для которого сопротивление оценивается с помощью параметрических методов. Далее отброшены варианты, которые не обеспечивают требуемые результаты и после этого определить ГДХ ограниченного числа полученных ранее вариантов, методами вычислительной гидродинамики. На последнем этапе с помощью модельных испытаний подтвердить результаты. Такой подход позволяет сократить затраты времени на определение ГДХ и обеспечить необходимую точность. Однако в этом случае необходимо знать расхождения использования разных методов определения ГДХ.

Основные исследования обтекания судов CFD-методами посвящены относительно крупным судам, скоростным яхтам и т.д. Однако, для небольших судов внутреннего плавания, в том числе вспомогательных, служебно-разъездных судов, буксиров и т.д. вопрос определения ГДХ не менее актуален с точки зрения эксплуатационных расходов на топливо. Небольшое число исследований сопротивления таких судов связано с одной стороны с особенностями их гидродинамики, обусловленными малыми значениями соотношения L/B , относительно высокими числами Фруда и V/T , с другой – мелкосерийностью их постройки. Количество параметрических методов, позволяющих рассчитать сопротивление судов этого типа, ограничено. Поэтому целью данной работы является анализ применимости известных методов для оценки сопротивления вспомогательных судов внутреннего плавания. Для этого была выполнена оценка сопротивления вспомогательного судна технического флота (мотозавозни) параметрическими и численными методами, а также сравнение полученных результатов.

Определение сопротивления судна параметрическими методами

Оценка сопротивления параметрическими методами выполнялась с помощью программ FreeShip и NavCad.

Программа FreeShip предназначена для трёхмерного моделирования поверхности, включая встроенные возможности расчёта гидростатических характеристик и параметрического анализа гидродинамики судна. Методы оценки сопротивления, реализованные в программе, основаны на статистической обработке результатов испытаний. В описаниях методов указаны пределы применимости и рекомендации по выбору сопутствующих параметров расчётов.

Программа NavCad непосредственно разработана для полного параметрического анализа ходкости и пропульсивных качеств судна. Свои расчёты NavCad базируется на большой библиотеке данных серийных испытаний моделей судов. Дополнительно включен мастер автоматического подбора методов к заданным параметрам расчёта.

На первом этапе была выполнена оценка сопротивления для представленного на рис. 1 базового корпуса при варьировании представленных в таблице 1 параметров.

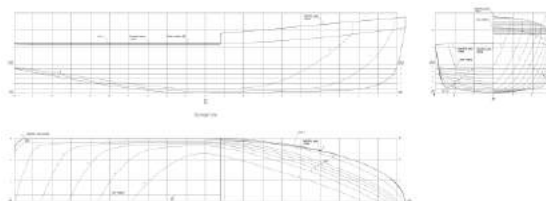


Рис. 1. Теоретический чертёж базового судна

Для расчёта представленного судна в программах были выбраны два метода: G. Van Oortmerssen (1971) [7] и DE Groot RB [8]. Первый метод реализован в программах NavCad и FreeShip, второй метод – только в программе NavCad.

Таблица 1

Параметры судна для прогнозирования сопротивления

	Параметр	Значение
1	Длина по КВЛ L_{wl} , м	23,671
2	Ширина по КВЛ B_{wl} , м	7,25; 7,00; 6,873; 6,65; 6,45
3	Осадка по КВЛ T , м	1,65
4	Высота борта H , м	2,75
5	Кэффициент общей полноты \square	0,500 - 0,580; шаг 0,02
6	Скорость v , м/с	3,62; 3,88; 4,14; 4,39; 4,65; 4,91; 5,17; 5,43; 6,20
7	Числа Фруда Fr	0,24; 0,25; 0,27; 0,29; 0,3; 0,32; 0,34; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,4; 0,41

Метод, предложенный G. Van Oortmerssen предназначен для определения сопротивления небольших судов, включая буксиры, и заключается в использовании регрессионных уравнений, полученных на основании статистической обработки результатов 93 серий модельных испытаний. Для программы NavCad первоначальный метод был модернизирован. Разработчик программы указывает, что метод учитывает форму профиля волны по борту судна; указывает, что кривая сопротивления близка к типичной только при числах Фруда ниже 0,3.

Метод DeGroot RB применим к корпусам с транцевой кормой, со скругленными скулами и

основан на численном представлении опубликованных графиков сопротивления моделей длиной 2,25м типа Nordstrom и NSMB. Кривые сопротивления для судов с острыми скулами построены по результатам испытаний моделей в Институте Стивенса. Ограничения по параметрам каждого метода приведены в табл. 2.

В табл. 2 обозначено:

C_x – коэффициент полноты площади мидель-шпангоута;

C_p – призматический коэффициент продольной полноты;

$C_{vol} = L_{wl} / Vol^{1/3}$ – относительная длина;

Vol – объемное водоизмещение.

В руководстве программы FreeShip указано, что в случае выхода задаваемых параметров за границы метода, для расчета используется метод Holtrop 1984 (1988) [9,10], который в первую очередь применим к торговым и военно-морским судам, и включает в том числе, результаты натурных испытаний. Метод основывается на результатах испытаний 334 серий моделей танкеров, сухогрузов, грузовых и, рыболовных судов, буксиров, контейнеровозов и военных кораблей. Метод достаточно надежен и широко используется в практике проектирования судов, но, по всей видимости, недостаточно применим для судов небольшой длины с транцевой кормой. В этом случае предусмотрено использование корректирующего форм-фактора, подбор которого зависит от скорости.

Смоченная поверхность Ω вычислялась по известной формуле А.Б. Карпова (1) для транспортных судов внутреннего плавания, т.к. в используемых программах используются только формулы для морских судов. В формулу была введена поправка 1,058 учитывающая изменение волновой поверхности судов с небольшим отношением L/B и полученная на основании обработки статистических данных по площадям смоченных поверхностей судов внутреннего плавания схожих размеров.

$$\Omega = V^{2/3} \cdot \left(5,1 + 0,074 \cdot \frac{L}{T} - 0,4 \cdot \delta \right) \cdot 1,058,$$

(1)

где $V = \delta LBT$ – объемное водоизмещение, м³.

С помощью программных продуктов FreeShip и NavCad было определено сопротивление почти для 700 расчетных случаев.

Необходимо отметить, что полученные результаты характеризуются достаточно большим разбросом, причем для некоторых скоростей методы дают результат, отличающийся примерно в два раза, например, при $Fr > 0,38$, что, по всей видимости, связано с особенностями регрессионных уравнений и пересчета модельных испытаний.

Таблица 2

Диапазоны изменения параметров приближенных методов

	Oortmerssen Freeship	Oortmerssen NavCAD	DE Groot RB NavCAD	Holtrop NavCAD	Holtrop Freeship
1.	$C_p=0,50 - 0,73$	$C_p=0,52 - 0,70$	$C_{vol}= 4,67 - 8,96$	$C_p=0,55 - 0,85$	$C_p=0,55 - 0,85$
2.	$L_{wl}/B_{wl}=3,4 - 6,2$	$L_{wl}/B_{wl}=3,4 - 6,2$	$L_{wl}/B_{wl}=3,53 - 10,1$ $Vol/L_{wl}=1,39 - 9,83$	$L_{wl}/B_{wl}=3,9 - 14,9$	$L_{wl}/B_{wl}= 3,9 - 14,9$
3.	$B_{wl}/T=1,9 - 4,0$	$B_{wl}/T=1,9 - 3,4$	$B_{wl}/T=2,72 - 6,58$	$B_{wl}/T=2,1 - 4,0$	$B_{wl}/T=2,1 - 4,0$
4.	$C_x=0,70 - 0,97$	$C_x=0,73 - 0,98$	$C_x=0,56 - 0,89$	-	-
5.	$le=10,0 - 46,0$	$le =10,0 - 38,0$	-	-	-
6.	$Fr=0,0 - 0,5$	$Fr=0,05 - 0,50$	$Fr=0,30 - 1,05$	$Fr=0,10 - 0,80$	$Fr=0,10 - 0,80$

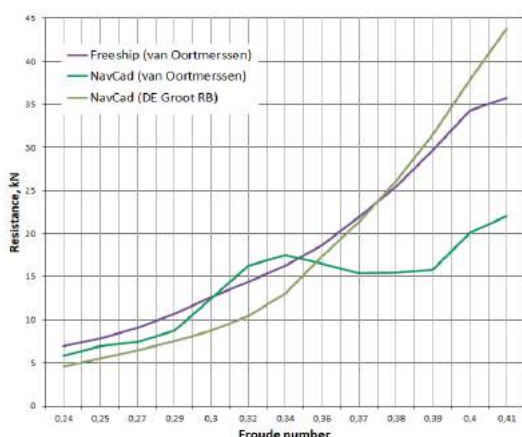


Рис. 2. Результаты расчета сопротивления методами G. van Oortmerssen (NavCad, Freeship) и DE Groot RB (NavCad) для судна шириной 6,873 м.

Определение сопротивления судна численными методами

Для определения сопротивления численными методами использовалась программа вычислительной гидродинамики (CFD) FineMarine™, предназначенная для решения задач корабельной гидродинамики, в том числе мореходности, судовых движителей и т.п.

Геометрия судна была построена в натуральных размерах для предотвращения появления масштабных эффектов [9] (рис. 3). Т.к. судно симметричное, то использовалась только половина корпуса по диаметральной плоскости для экономии машинного времени.

Для решения уравнений движения жидкости при моделировании в сеточном генераторе HEXPRESS™ были построены два типа неструктурированных расчетных сеток с использованием различных подходов. Для сетки Mesh 1 средней плотности, которая строилась в ручном режиме, начальное количество ячеек составило 3456.

Учет особенностей движения жидкости в пограничном слое вблизи корпуса при

водоизмещающем режиме обеспечивался подсеточным разрешением 17-19 при $y^+ = 1$ [17, 18].

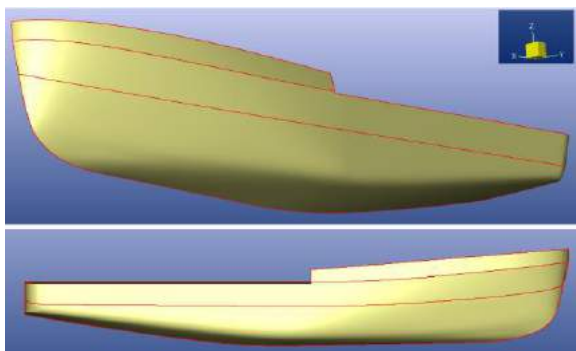


Рис. 3. Твердотельная геометрия корпуса судна

Сетка Mesh 2 большей плотности с начальным количеством ячеек 6750 основывалась на автоматическом подходе FineMarine™, реализованном в модуле C-Wizard. Автоматически рассчитанное значение y^+ в зависимости от скорости и размеров судна составило 65. Окончательное число ячеек составило 3587321 в первом случае и 4720166 во втором. Параметры расчетных сеток приведены в табл. 3. Граничные условия и вид расчетной сетки в поперечном сечении показаны на рис. 4 и 5.

Моделировалось только прямолинейное движение – одна степень свободы – вперед (назад) в стационарной постановке. Использовалась «K- ω SST» модель турбулентности с пристеночными функциями и схема дискретизации по времени второго порядка. Кроме того, задавались параметры среды – воды и воздуха – при температуре 15°C. Использовался закон $\frac{1}{2}$ синусоиды для разгонного участка, время разгона уменьшалось при снижении скорости.

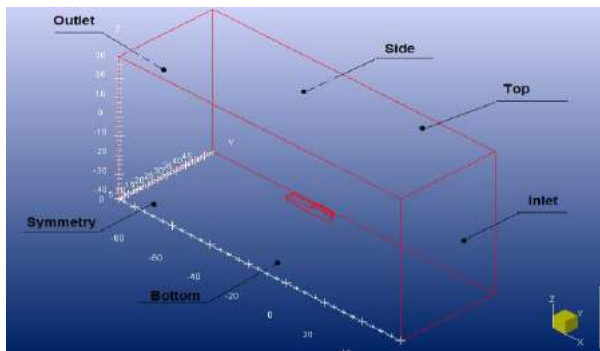


Рис. 4. Расчетный домен и граничные условия

3.	Свободная поверхность	8, (3,70867; 3,70867; 0,02897)	8, (2,96694; 2,96694; 0,02317)
4.	y^+	1	65
5.	Общее количество ячеек	3 587 321	4 720 166

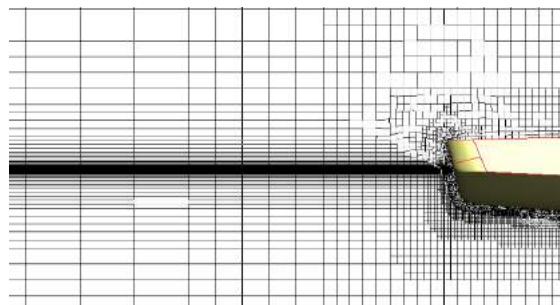


Рис. 5. Общий вид расчетной сетки (поперечное сечение)

Результаты моделирования в виде кривых сопротивления от чисел Фруда приведены на рис. 6.

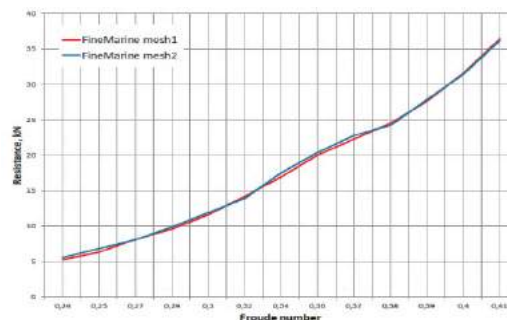


Рис. 6. Сопротивление модели на двух различных сетках (FineMarine)

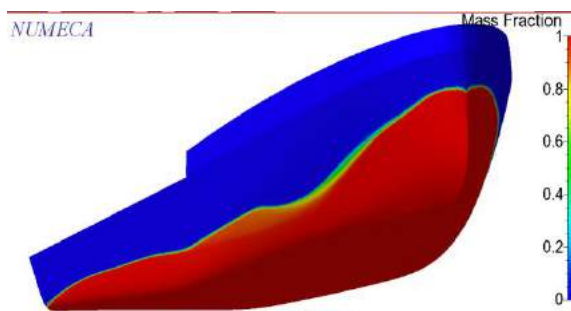


Рис. 7. Пример смоченной поверхности при движении судна со скоростью 5,43 м/с

Таблица 3
Параметры расчетных сеток

Параметр сетки	Значение	
	Mesh 1	Mesh 2
1. Начальная сетка (x:y:z):	24:12:12	30:15:15
2. Адаптация:		
транец	8	8
борт	7	7
палуба	4	4
нос в районе палубы	5	5

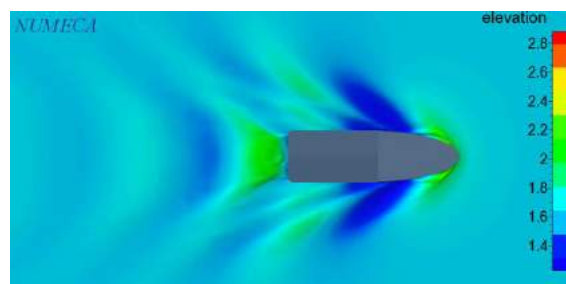


Рис. 8. Волновая поверхность при движении судна со скоростью 5,43 м/с

Результаты моделирования на сетках различной плотности показали, что увеличение количества ячеек не приводит к существенному изменению результатов, и это позволяет использовать более грубую сетку чтобы получить результат с меньшими затратами машинного времени.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты (табл. 4 и рис. 9) показывают, что разброс в величине сопротивления, определенного различными методами, может достигать больших значений.

Результаты вычислений показывают, что однозначного параметрического метода, реализованного в рассмотренных пакетах программ, и который бы позволял рассчитать сопротивление вспомогательного судна внутреннего плавания с достаточной степенью точности, видимо, на данный момент не существует.

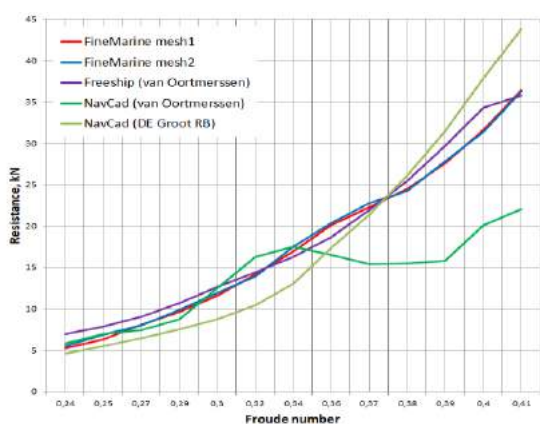


Рис. 9. Сравнение результатов определения сопротивления различными методами

Результаты, полученные в разных программах, но одним и тем же методом, существенно отличаются. Проведено сравнение результатов расчётов параметрическими методами с результатами численного моделирования. Расчёты в программе FreeShip методом van Oortmerssen показывают значения, наиболее приближенные к результатам численного моделирования при $Fr > 0,29$, но в NavCad этот же метод в диапазоне Fr от 0,29 до 0,41 показывает отличие от 0 до 40 процентов. Метод DE Groot RB практически во всём диапазоне расчётных скоростей ($Fr=0,24...0,36$) показывает большую ошибку, понижая сопротивление на 14...26%, и завышает результат при $Fr=0,41$ до 20%. При проектной скорости 5,43 м/с, соответствующей числу $Fr=0,36$, наиболее близкий к численному результат показывает метод van Oortmerssen реализованный в FreeShip.

Были выполнены дополнительные расчеты сопротивления по методу Holtrop с учетом того, что отношение $V/T=4,16$ для рассматриваемого судна выходит за верхний предел применимости данного метода. Результаты показали, что FreeShip не выполняет автоматическую замену метода и выдаёт заниженные на 20% значения сопротивления. В то же время расчеты по методу Holtrop в программе NavCad показывают удовлетворительную сходимость с результатами, полученными в FineMarine (рис. 9).

Таблица 4

Результаты определения сопротивления различными методами

Velocity, m/s	Froude number	Resistance, kN				
		FineMarine mesh1	FineMarine mesh2	Freeship (van Oortmerssen)	NavCad (van Oortmerssen)	NavCad (DE Groot)
3,62	0,24	5,2	5,49	6,985	5,79	4,6
3,88	0,25	6,32	6,84	7,855	6,97	5,45
4,14	0,27	8,1	8,03	9,044	7,4	6,43
4,39	0,29	9,6	9,83	10,72	8,77	7,53
4,65	0,3	11,6	11,91	12,61	12,49	8,77
4,91	0,32	14,2	13,91	14,42	16,27	10,42
5,17	0,34	16,9	17,54	16,26	17,54	13,07
5,43	0,36	20,06	20,37	18,62	16,53	17,34
5,59	0,37	22,3	22,74	22	15,36	21,4
5,74	0,38	24,48	24,21	25,43	15,51	26,1
5,89	0,39	27,6	27,79	29,66	15,8	31,5
6,04	0,4	31,4	31,4	34,29	20,12	37,9
6,2	0,41	36,4	36,22	35,78	22,07	43,78

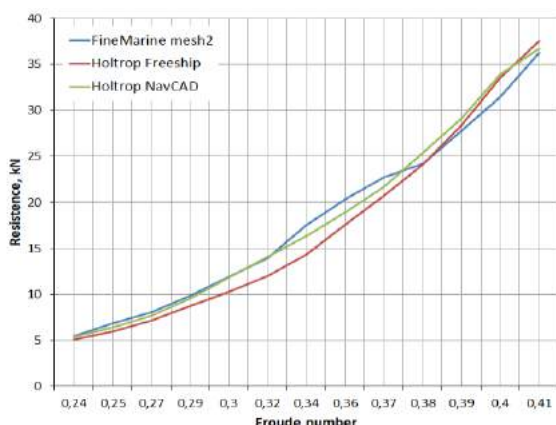


Рис. 9. Сравнение результатов определения сопротивления методом Holtrop и CFD-методом в программе FineMarine

Существенные расхождения в определении сопротивления приближенными методами могут быть объяснены тем, что рекомендуемые методы предназначены в первую очередь для морских судов, поэтому некоторые соотношения небольших судов внутреннего плавания находятся очень близко к границам применимости методов или выходят за их пределы. В первую очередь это относится к соотношению V_{w}/T , которое у вспомогательных судов внутреннего плавания достигает значений, которые выходят за границы применимости методов, хотя значение призматического коэффициента $C_p=0,63$ в рассматриваемом случае попадает в

диапазон применимости. Точность определения сопротивления параметрическими методами также зависит от правильности оценки площади смоченной поверхности судна. Разница в оценках по исправленной формуле А.Б. Карлова и численным моделированием составляет от 4 до 5 процентов, что вполне может быть причиной расхождений при высоких скоростях. Кроме того, несмотря на то, что регрессионные уравнения одного и того же метода одинаковы, их программная реализация может существенно отличаться.

Заключение

Представлены результаты сравнения сопротивления, определенного приближенными методами: параметрическими (vanOortmerssen, DE Groot RB, Holtrop), реализованными в программных продуктах Freeship и NavCad, и вычислительной гидродинамики – в программе FineMarine.

Полученные результаты могут уменьшить затраты времени на определение ГДХ судов на начальном этапе проектирования за счет совместного использования различных методов и известной величины ошибки.

Выполненные исследования показывают, что для судов технического флота внутреннего плавания с небольшими отношениями L/V и $V/T > 4.0$ целесообразно разработать специальный метод, основанный на результатах модельных, натурных испытаний, а также численного моделирования, который бы позволил точнее определять ГДХ на начальном этапе проектирования.

Литература

1. А. Назаров. Расчеты сопротивления малых судов. // Катера и Яхты, №237. Электронный ресурс, режим доступа <https://yachtshipyard.wordpress.com/2013/04/28/расчеты-сопротивления-малых-судов/>
2. Численное и экспериментальное исследование сопротивления модели буксира с помощью программного комплекса NUMECA FINE/MARINE Никущенко Д.В., Чебан Е.Ю., Вьюшкин А.Р., Михайлов Д.С. Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4-1 (38). С. 177-182.
3. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
4. Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) – Cortona (Italy) on April 15th -17th.
5. Овчинников К.Д. Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 6, 2019 г., стр. 195-202. DOI: 10.15514/ISPRAS– 2019–31(6)–12. Электронный ресурс, режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-polnogo-soprotivleniya-korpusa-sudna-na-razlichnyh-skorostyah-hoda/viewer>.
6. Борис Станков, Андрей Печенюк. Цифровые технологии в проектировании судов: использование комплекса FlowVision. САПР и графика №3 - 2015С. 78-82. Электронный ресурс, режим доступа <https://sapr.ru/article/24830>
7. Oortmerssen, G. van, "A Power Prediction Method and its Application to Small Ships", International Shipbuilding Progress, Vol. 18, No. 207, 1971.
8. DeGroot, O., "Resistance and Propulsion of Motor-Boats", International Shipbuilding Progress, Vol.2, No. 6, 1955.
9. Holtrop, J., "A Statistical Resistance Prediction Method With a Speed Depended Form Factor", Proceedings SMSSH'88, Varna, Oct 1988.
10. Holtrop, J., "A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data", International Shipbuilding Progress, Vol. 31, No. 363 Nov 1984.
11. Holtrop, J. and Mennen, G.G.J., "An Approximate Power Prediction Method", International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No. 335, Jul 1982.

References

1. Nazarov. Raschetny soprotivleniya malyh sudov. // Katera i YAhty, №237. Elektronnyj resurs, rezhim dostupa <https://yachtshipyard.wordpress.com/2013/04/28/расчеты-сопротивления-малых-судов/>

2. Nikuschenko Dmitry V., ChebanEgor Yu., Vyushkin Alexey R., Mikhailov Dmitry S. Numerical and experimental studies of tug model water resistance by NUMECA FINE/MARINE™ CFD code. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. № 4-1 (38). S. 177-182.
3. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
4. Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) – Cortona (Italy) on April 15th -17th.
5. Ovchinnikov K.D. Analysis of total resistance for different ship speeds. Programming and computer software. Vol 31, No 6, 2019 г., pp. 195-202. DOI: 10.15514/ISPRAS– 2019–31(6)–12. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-polnogo-soprotivleniya-korpusa-sudna-na-razlichnyh-skorostyah-hoda/viewer>.
6. Boris Stankov, Andrej Pechenyuk. Cifrovye tekhnologii v proektirovanii sudov: ispol'zovanie kompleksa FlowVision. SAPR i grafika №3 - 2015S. 78-82. Elektronnyj resurs, rezhim dostupa <https://sapr.ru/article/24830>
7. Oortmerssen, G. van, "A Power Prediction Method and its Application to Small Ships", International Shipbuilding Progress, Vol. 18, No. 207, 1971.
8. DeGroot, O., "Resistance and Propulsion of Motor-Boats", International Shipbuilding Progress, Vol.2, No. 6, 1955.
9. Holtrop, J., "A Statistical Resistance Prediction Method With a Speed Depended Form Factor", Proceedings SMSSH'88, Varna, Oct 1988.
10. Holtrop, J., "A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data", International Shipbuilding Progress, Vol. 31, No. 363 Nov 1984.
11. Holtrop, J. and Mennen, G.G.J., "An Approximate Power Prediction Method", International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No. 335, Jul 1982.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Егор Юрьевич Чебан доктор технических наук, доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5 e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Дмитрий Владимирович Никущенко доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121 e-mail: ndmitry@list.ru

Евгения Александровна Лукина кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5 e-mail: evair@yandex.ru

Ольга Вадимовна Мартемьянова аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: dovnn@yandex.ru

Михаил Юрьевич Тихобаев магистрант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 e-mail: mihailtihobaev913@gmail.com

Egor Yu. Cheban Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5 e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Dmitry V. Nikushchenko professor, Dr. Sci. (Eng), professor of department of applied mathematics and mathematical modelling, vice-rector for research, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, e-mail: ndmitry@list.ru

Evgeniya A. Lukina Ph.D. (Eng), Associate Professor, professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5 e-mail: evair@yandex.ru

Olga V. Martmianova post graduate student of Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5. e-mail: dovnn@yandex.ru

Michael Yu. Tikhobaev master student Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5 e-mail: mihailtihobaev913@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.11.2021.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.05.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 26.05.2022.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.043>

Повышение работоспособности лезвийного режущего инструмента методом ионно-вакуумной модификации рабочих поверхностей

Ю.М. Зубарев¹ iuzubarev@mail.ru, А.И. Круглов² andoscar@yandex.ru,

М.А. Афанасенков³ afanasenkov.mi@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Санкт-Петербургский политехнический Университет Петра Великого, ³АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»

Аннотация. В представленной работе рассматривается применение пучковых технологий для реализации электрофизической обработки поверхности твердосплавного лезвийного режущего инструмента в целях повышения его работоспособности при обработке резанием различных сталей и сплавов. Нанесение различного рода износостойких многослойных покрытий на рабочие поверхности режущих инструментов с применением методов пучковых технологий является универсальным способом повышения эксплуатационных характеристик и общей надежности металлообрабатывающих инструментов. Одним из наиболее эффективных способов нанесения функциональных многослойных покрытий на режущую часть лезвийного металлорежущего инструмента является метод ионно-вакуумной модификации его рабочих поверхностей. Таким образом, метод ионно-вакуумной модификации открывает широкие возможности для формирования на функциональной части инструмента требующихся, наперед заданных, эксплуатационных параметров резания, так же позволяет определять термомеханические нагрузки на режущую часть инструмента и управлять механизмами его изнашивания, что, в свою очередь, позволяет обеспечить увеличение периода стойкости инструмента и повысить его работоспособности в целом.

Ключевые слова: Пучковые технологии; ионно-вакуумная модификация; повышение эффективности; увеличение работоспособности; твердый сплав; режущий инструмент; износостойкие покрытия; период стойкости.

Для цитирования: Зубарев Ю.М., Круглов А.И., Афанасенков М.А. Повышение работоспособности лезвийного режущего инструмента методом ионно-вакуумной модификации рабочих поверхностей. 2022. № 2 часть 2. С. 66—71.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.043>

Improving the workability of blade cutting tools by the method of ion-vacuum modification of working surfaces

Urii M. Zubarev¹ iuzubarev@mail.ru, Alexander I. Kruglov² andoscar@yandex.ru,

Mikhail A. Afanasenkov³ afanasenkov.mi@yandex.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation, ³Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. In the presented work, the application of beam technologies for the implementation of electrophysical surface treatment of a carbide blade cutting tool is considered in order to improve its performance when cutting various steels and alloys. The application of various kinds of wear-resistant multilayer coatings on the working surfaces of cutting tools using beam technology methods is a universal way to improve the performance and overall reliability of metalworking tools. One of the most effective ways of applying functional multilayer coatings to the cutting part of a blade metal cutting tool is the method of ion-vacuum modification of its working surfaces. Thus, the ion-vacuum modification method opens up ample opportunities for the formation of the required, predetermined, operational cutting parameters on the functional part of the tool, as well as allows you to determine thermomechanical loads on the cutting part of the tool and control the mechanisms of its wear, which, in turn, allows you to increase the durability period of the tool and improve its overall performance.

Keywords: Beam technologies; ion-vacuum modification; increased efficiency; increased efficiency; hard alloy; cutting tools; wear-resistant coatings; durability period.

For citation: Urii M. Zubarev, Alexander I. Kruglov, Mikhail A. Afanasenkov, Improving the workability of blade cutting tools by ion-vacuum modification of working surfaces. 2022. № 2 part 2. P. 66—71.

Введение

Улучшение эксплуатационных характеристик лезвийного режущего инструмента, таких как износостойкость, тепло-, коррозионная стойкость, твердость, микрорельеф поверхности и другие, являются одним из основных направлений повышения ресурса и надежности их работы. Важные эксплуатационные показатели работоспособности инструментов – долговечность и безотказность в работе, в значительной степени определяются качеством их рабочих поверхностных слоев. Именно в этих слоях зарождаются и развиваются процессы термической и механической усталости, пластической деформации, истирания и коррозии, приводящие к повышенному износу режущего инструмента, снижению производительности обработки и качества металла поверхностного слоя. Формирование высококачественных поверхностных слоев – одно из наиболее эффективных средств повышения работоспособности режущих инструментов [4].

Наряду с традиционными способами повышения эксплуатационных свойств – термическая и химико-термическая обработка, упрочнение поверхности путем пластического деформирования, полирования, легирования и другими в настоящее время появились новые перспективные, так называемые физико-технические, или электрофизические способы обработки. Эти способы, как правило, связаны с использованием различных нетрадиционных источников энергии (лазерная, плазменная, ультразвуковая, магнитная, электронная, ионная обработки), обладают высокой производительностью, хорошей воспроизводимостью результатов, способны гораздо сильнее влиять на свойства поверхностных слоев, чем традиционно применяемая поверхностная обработка. К таким способам относится обработка изделий в вакууме с использованием энергии пучков ускоренных ионов и атомов вещества [1, 2, 3, 5, 6, 7].

Эти способы в большей или меньшей степени изменяют свойства поверхности изделий, т.е. модифицируют их. Поэтому все они получили общее название – ионно-вакуумная модификация.

Режущие инструменты из металллокерамических твердых сплавов обладают более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с инструментами из инструментальных сталей. Однако им присущи и некоторые недостатки, такие, как высокая стоимость, невысокие прочностные характеристики при работе на изгиб и растяжение, хрупкий характер разрушения при воздействии циклических силовых и тепловых нагрузок. Последнее обстоятельство особенно сильно проявляется при использовании металллокерамических твердых сплавов в качестве инструментальных материалов для режущих элементов инструментов, работающих в условиях прерывистого резания, в частности, фрез, которые и стали объектом исследований, представленных в данной работе.

В связи с вышеизложенным, улучшение эксплуатационных характеристик поверхностных слоев инструментов из металллокерамических твердых сплавов посредством их ионно-вакуумной модификации является решением актуальной

научной задачи, имеющей важное народнохозяйственное значение.

1. Ионно-вакуумная модификация

Цель данной статьи - разработка технологических рекомендаций для повышения работоспособности инструментов из металллокерамических твердых сплавов, работающих в условиях прерывистого резания, на основе направленного улучшения свойств их поверхности слоев посредством ионно-вакуумной модификации. Для достижения указанной цели в лабораторных и производственных условиях были проведены исследования по влиянию ионно-вакуумной модификации на физико-механические и эксплуатационные свойства инструментов из твердых сплавов, работающих в условиях прерывистого резания. На основании результатов этих исследований разработаны и представлены технологические рекомендации для реализации процесса ионно-вакуумной модификации твердосплавных инструментов, работающих в условиях прерывистого резания [1].

Одной из важнейших особенностей метода ионной обработки является независимость от диффузионных констант, что способствует его эффективному применению в случаях затрудненности, или невозможности, использования обычных способов легирования [7]. Возможность атермического введения примесей и дефектов в определенной концентрации, не зависящей от растворимости, позволяет при имплантации формировать в условиях комнатной температуры (20°C) новые метастабильные твердые растворы в поверхностном слое, получение которых традиционными методами невозможно. При этом введение небольших количеств примесей (-1 атомный вес) приводит к образованию твердых растворов замещения и внедрения, а при большей концентрации (-10 атомов %) наблюдается формирование метастабильных твердых растворов и аморфных сплавов [8, 9, 10, 11].

В настоящее время, когда ионная обработка все шире используется в механообрабатывающем производстве, возникла также необходимость в разработке системного подхода к выбору имплантируемых элементов покрытия, обеспечивающих заданные физико-химические свойства ионно-модифицируемых слоев, что и было выполнено авторами [10]. Этот подход включает в себя как оценку химического состава и структуры поверхностного слоя после ионной обработки, так и оценку изменения этих факторов в процессе эксплуатации инструмента.

2. Экспериментальные данные

Выполненные стойкостные испытания торцевых фрез, оснащенных пластинами твердых сплавов BK8 и T15K6, при обработке различных конструкционных сталей и титановых сплавов, показали увеличение работоспособности инструментов, прошедших ИВМ по разработанным технологическим рекомендациям, в среднем в 1,5...4,0 раза. Причем стойкость фрез, режущие пластины которых были подвергнуты ИВМ, оказалась выше стойкости фрез с покрытием пластин TiN по методу КИБ, при обработке: Стали 45- в 1,3 раза, Стали 12X13 – в 1,1...1,3 раза, Стали 10X18H9T – в 1,8 ...2,0 раза, титанового сплава BT5–

в 1,5...3,1 раза, в зависимости от марки твердого сплава (Рис. 1,2,3,4).

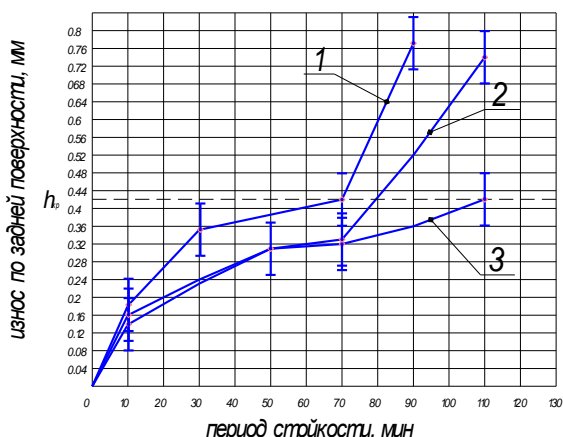


Рис. 1 Результаты стойкостных испытаний торцевых фрез, фрезеровании Стали 45 твердосплавными пластинами T15K6 (1), T15K6 (с покрытием TiN) (2), T15K6 (с покрытием Cr-Al-(Ti+N)) (3). Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин.

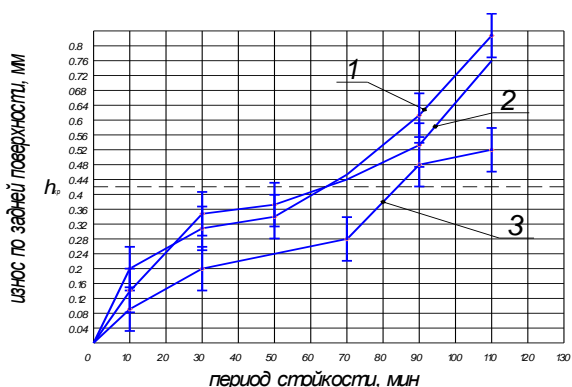


Рис. 2 Результаты стойкостных испытаний торцевых фрез, фрезеровании стали 12X13 твердосплавными пластинами T15K6 (1), T15K6 (с покрытием TiN) (2), T15K6 (с покрытием Cr-Al-(Ti+N)) (3). Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин

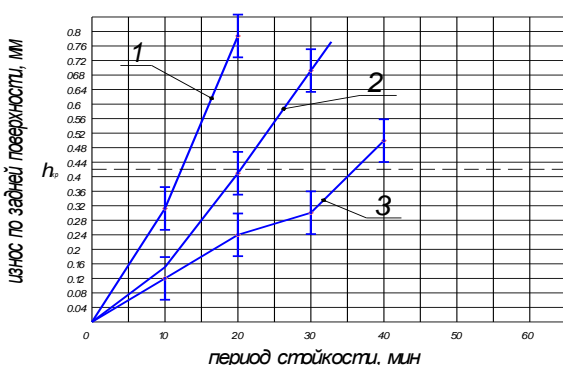


Рис. 3 Результаты стойкостных испытаний торцевых фрез, фрезеровании стали 10X18H9T твердосплавными пластинами T15K6 (1), T15K6 (с покрытием TiN) (2), T15K6 (с покрытием Cr-Al-(Ti+N)) (3). Режимы: $t=1,5$ мм, $S=10$ мм/мин, $V=140$ м/мин

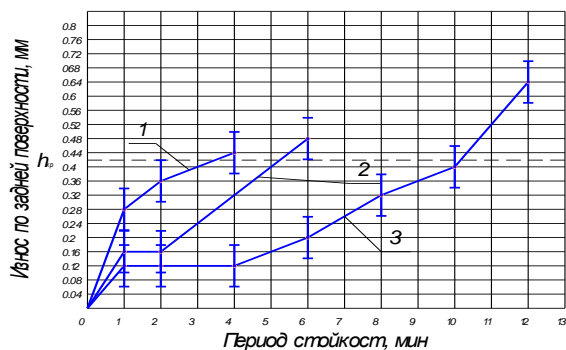


Рис. 4 Результаты стойкостных испытаний торцевых фрез, фрезеровании титанового сплава BT-5 твердосплавными пластинами BK8 (1), BK8 (с покрытием TiN) (2), BK8 (с покрытием Cr-Al-(Ti+N)) (3). Режимы: $t=2,5$ мм, $S=31,5$ мм/мин, $V=65$ м/мин

3. Технологические рекомендации по последовательности и содержанию операций ионно-вакуумной модификации металлорежущего инструмента

На основании результатов представленных экспериментов и работ, выполненных ранее [2, 5, 6, 7, 8, 10, 11], можно предложить разработанные технологические рекомендации по последовательности и содержанию операций ионно-вакуумной модификации металлорежущих инструментов из металлокерамических твердых сплавов.

Предлагаются следующие стадии ее разработки:

1. Выбор структуры поверхностного слоя, химических элементов и соединений для формирования слоев предложенной структуры. Оценка свойств функциональных слоев модифицированного поверхностного слоя.

2. Выбор базовых способов ионно-вакуумных воздействий и определение их параметров для операции ИВМ по переходам: распыление, формирование переходного слоя, нанесение функциональных слоев покрытия.

3. Составление маршрутного техпроцесса ионной обработки, исходя из операций по входному контролю, зачистке поверхностей инструментов, подлежащих модификации, самой операции ИВМ и операций по контролю качества ионной обработки.

4. Составление технологической документации на операции и переходы. Здесь и ранее подразумевается использование ионной обработки как завершающей операции в технологическом процессе изготовления или восстановления эксплуатационных свойств режущих инструментов. Это не исключает использования ионных процессов и в качестве промежуточной, в некоторых случаях размерной операции обработки изделия. Например, использование процесса ионного распыления для замены операций механической чистовой абразивной обработки рабочих поверхностей, для удаления относительно небольших заусенцев, залечивания дефектов (каверн, трещин), являющихся причиной отбраковки изделий в процессе их изготовления и др.

При разработке содержания технологической операции ионно-вакуумной модификации инструментов следует:

1. Рассматривать переход «распыление поверхности» в операции ионно-вакуумной обработки не только как средство очистки поверхности в вакууме от адсорбированных газов и загрязнений и подготовки ее к нанесению покрытия, но и как один из самостоятельных способов размерной ионно-вакуумной модификации, автоматически выявляющий и удаляющий микродефекты поверхностного слоя. Исходя из этого, по возможности принимать толщину распыляемого слоя равной или больше толщины дефектного слоя, зависящей от предшествующих операций изготовления изделий.

2. Используя низкоэнергетическую ионную имплантацию, формировать переходную зону между основным материалом и покрытием, повышающую адгезионную прочность последнего.

3. Выбирать способ нанесения покрытия, исходя из теплостойкости инструментального материала и назначения инструмента. Ограничивать предельно допускаемую температуру нагрева при ИВМ величиной на 50...100 градусов ниже теплостойкости инструментального материала.

При этом проектировании содержания операции ИВМ необходимо:

1. Во всех случаях первым переходом операции ИВМ должно быть распыление дефектного поверхностного слоя. Иногда этот переход называют «ионно-вакуумная очистка поверхности». Назначение этого перехода:

- получение на поверхности материала основы стехиометрии, определяемой химической формулой сплава основы;
- активизация поверхностных атомов в кристаллической решетке;
- удаление поверхностного слоя, содержащего дефекты (трещины, пары, примесные адсорбированные атомы, молекулы и др.), которые в дальнейшем могут стать зародышами (очагами) разрушения при эксплуатации инструмента.

2. Содержание второго перехода технологической операции ИВМ – создание

переходного модифицированного слоя между основной и последующими подслоями покрытия. Назначение переходного слоя – плавное изменение физико-механико-химических свойств от основы к покрытию. Такой переходный слой определяет хорошую адгезию покрытия к материалу изделия. В некоторых случаях созданный на данном переходе модифицированный слой может быть внешним рабочим слоем инструмента, непосредственно контактирующим с поверхностью заготовки при ее обработке.

3. Назначение последующих переходов операции ИВМ – формирование композитного покрытия, состоящего из набора функциональных подслоев, обеспечивающих требуемые физико-химико-механические и эксплуатационные свойства изделия, такие, как твердость, пластичность, отсутствие сродства к обрабатываемому материалу, износ- и коррозионная стойкости, теплопрочность и др. Перечень требуемых свойств определяется в каждом конкретном случае, исходя из анализа условий работы инструмента, материала и свойств заготовки, причин потери инструментом работоспособности, т.е. выхода из строя.

В качестве способов ионно-вакуумной обработки для реализации разработанной структуры операции ИВМ рекомендуется использовать следующее. Для осуществления распыления дефектного поверхностного слоя – бомбардировку поверхности ионами инертных газов, осуществляется как правило – ионами аргона. При этом следует использовать схемы ионно-плазменного и ионно-лучевого травления. Для формирования переходного слоя – использовать низкоэнергетическую ионную имплантацию с энергией ионов 20...40 КэВ. Для формирования подслоев покрытия – термо-ионное напыление, а конденсацию в условиях ионной бомбардировки и напыление - с использованием магнетронной распылительной системы. Конкретные рекомендации по выбору способов ИВО сведены в табл. 1.

Таблица 1

Способы ионно-вакуумной обработки, рекомендуемые для реализации технологических переходов операции ИВМ

Содержание перехода операции ИВМ	Особенности формы обрабатываемых поверхностей и тип модифицирующих элементов	Способ ионно-вакуумной обработки
Распыление дефектного поверхностного слоя	Поверхности простой формы (плоскости, тела вращения)	Ионно-плазменное травление по диодной схеме в атмосфере инертного газа
	Сложные фасонные поверхности	Ионно-плазменное травление по триодной схеме в атмосфере инертного газа
	Участки поверхности для селективного травления	Ионно-лучевое травление; Ионно-плазменное травление по триодной схеме с применением защитных масок
	Канавки, пазы	Ионно-лучевое травление
Формирование переходного подслоя	Модифицирующие элементы – газовые ионы	Ионная имплантация с использованием высокочастотных источников газовых ионов
	Модифицирующие элементы – ионы твердых веществ, в т.ч. металлов	Термоионное осаждение покрытия с дополнительной ионизацией паров модифицирующих металлов и ускорением ионной фазы ($E > 15...20$ КэВ)

Формирование однослойного функционального покрытия	Состав покрытия – чистые металлы и соединения со стехиометрией состава материала катода	Конденсация покрытий в условиях ионной бомбардировки (метод КИБ) в атмосфере инертного газа
		Нанесение покрытия с помощью магнетронной распылительной системы (МРС) в атмосфере инертного газа
	Состав покрытия – сплавы и соединения, формируемые на обрабатываемой поверхности	Метод КИБ в атмосфере реактивного газа
		Нанесение покрытия с помощью МРС в атмосфере реактивного газа
Формирование многослойного функционального покрытия	Состав подслоев покрытия – чистые металлы, и соединения со стехиометрией состава материалов катода	Метод КИБ с применением дополнительного катода в атмосфере инертного газа
		Нанесение покрытия с помощью МРС с секторным катодом в атмосфере инертного газа
	Состав подслоев покрытия – сплавы и соединения, формируемые на обрабатываемой поверхности	Нанесение композитного покрытия с помощью МРС с секторным катодом в атмосфере реактивного газа
		Нанесение подслоев покрытия с помощью последовательного использования МРС с кальцевым или прямоугольными катодами в атмосфере реактивных газов.

Для реализации технологической операции ионно-вакуумной модификации целесообразно использовать промышленное оборудование, которое позволяет выполнять те способы обработки, которые выбраны по изложенным выше рекомендациям для осуществления технологических переходов ионно-вакуумной операции. К этому оборудованию, кроме указанных стандартных функций, следует предъявлять следующие дополнительные требования:

- локализовать тлеющий разряд на обрабатываемых поверхностях;
- обеспечить высокую скорость распыления модифицируемых поверхностей;
- обеспечить верхнюю границу абсолютной величины ускоряющего ионы напряжения не менее 12...20 кВ;
- осуществлять регулирование степени ионизации парогазового потока, идущего на обрабатываемые поверхности;
- предусмотреть возможность относительного перемещения модифицируемых изделий и источников парогазового потока.

Достаточно часто бывает трудно выбрать стандартное промышленное оборудование, отвечающего всем требованиям универсальности. В связи с этим приходится идти на модернизацию имеющегося оборудования.

Выводы

Методы ионной модификации открывают широкие возможности для целенаправленного и управляемого изменения поверхностных свойств материалов, синтеза новых метастабильных твердых растворов и создания новых материалов, обладающих повышенной износостойкостью и работоспособностью.

Экспериментальные исследования подтверждают правильность предложенных научных положений и технологических рекомендаций по формированию с помощью ионно-вакуумной обработки рациональной структуры поверхностных слоев твердосплавных инструментов, обеспечивающей направленное изменение их химического состава, повышение микротвердости, отвод тепла от режущей кромки и, в целом, повышения их периода стойкости.

Литература

1. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. – М.: Металлургия, 1990 г.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.
3. Боровицкий Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика. – М.: Машиностроение, 2007. – 462 с.
4. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. - М: Машиностроение, 2011.- 368 с.
5. Зубарев Ю.М., Ревин Н.Н. Повышение работоспособности деталей машин и инструментов. – С-Пб.: Изд-во С-Пб ГПУ, 2013. – 125 с.
6. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы - СПб.: «Лань», 2014.-304 с.
7. Сенчило И.А., Зубарев Ю.М., Круглов А.И. и др. Технология обработки с использованием потоков высокоэнергетических частиц.- СПб: Издательство ПИМаш, 2004.- 116 с.
8. Зубарев Ю.М., Круглов А.И., Афанасенков М.А. Ионно-вакуумная модификация – эффективный метод повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента. «Инновации на транспорте и в машиностроении», т.3, «Технологические процессы в машиностроении». Под редакцией Максарова В.В. – СПб.: НМСУ «Горный», 2015, с. 5 – 9.
9. Справочник технолога / под. Ред. А.Г. Сулова – М.: Инновационные технологии, 2019. – 800 с.
10. Зубарев Ю.М., Круглов А.И., Афанасенков М.А. Метод выбора элементов для модификации рабочих поверхностей инструментов ионно-вакуумной обработкой с применением конфигурационной модели вещества. -Металлообработка, №3/2019,с. 49-53.

11. Зубарев Ю.М., Афанасенков М.А. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента путем нанесения функциональных покрытий на его режущую часть. Труды СПбГМТУ, №4(46), т.1. 2019, с. 91-96.

References

1. Komarov F.F. Ionnaya implantaciya v metally [Ion implantation in metals]. M.: Metallurgiya, 1990 g.
2. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkim pokrytiem [Operability of a cutting tool with a wear-resistant coating]. M.: Mashinostroenie, 1993. 336 s.
3. Borovickij G.V., Grigor'ev S.N., Maslov A.R. Spravochnik instrumental'shchika [Toolmaker's Handbook]. M.: Mashinostroenie, 2007. 462 s.
4. Grigor'ev S.N. Metody povysheniya stojkosti rezhushchego instrumenta [Methods of increasing the durability of cutting tools]. M.: Mashinostroenie, 2011. 368 s.
5. Zubarev YU.M., Revin N.N. Povyshenie rabotosposobnosti detalej mashin i instrumentov [Improving the performance of machine parts and tools]. S-Pb.: Izd-vo S-Pb GPU, 2013. 125 s.
6. Zubarev YU.M. Sovremennye instrumental'nye materialy [Modern instrumental materials]. SPb.: «Lan'», 2014. 304s.
7. Senchilo I.A., Zubarev YU.M., Kruglov A.I. i dr. Tekhnologiya obrabotki s ispol'zovaniem potokov vysokoenergeticheskikh chastic [Processing technology using high-energy particle flows]. SPb.: Izdatel'stvo PIMash, 2004. 116 s.
8. Zubarev YU.M., Kruglov A.I., Afanasenkov M.A. Ionno-vakuumnaya modifikaciya effektivnyj metod povysheniya ekspluatacionnyh svojstv metallovezhushchego instrumenta. [Ion-vacuum modification is an effective method of improving the operational properties of metal-cutting tools] «Innovacii na transporte i v mashinostroenii», t.3, «Tekhnologicheskie processy v mashinostroenii». Pod redakciej Maksarova V.V. SPb.: NMSU «Gornyj», 2015, s. 5...9.
9. Spravochnik tekhnologa [Technologist's Handbook] / pod. Red. A.G. Suslova M.: Innovacionnye tekhnologii, 2019. – 800 s.
10. Zubarev YU.M., Kruglov A.I., Afanasenkov M.A. Metod vybora elementov dlya modifikacii rabochih poverhnostej instrumentov ionno-vakuumnoj obrabotkoj s primeneniem konfiguracionnoj modeli veshchestva [Method of selection of elements for modification of working surfaces of instruments by ion-vacuum treatment using a configuration model of a substance]. Metalloobrabotka, №3.2019, s. 49...53.
11. Zubarev YU.M., Afanasenkov M.A. Povyshenie iznosostojkosti metallovezhushchego instrumenta putem nanoseniya funkcional'nyh pokrytij na ego rezhushchuyu chast' [Increasing the wear resistance of metal-cutting tools by applying functional coatings to its cutting part]. Trudy SPbGMTU, №4(46), t.1. 2019, s. 91...96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Михайлович Зубарев, доктор технических наук, профессор кафедры технологии судового машиностроения Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Андрей Игоревич Круглов, кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195121, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: andoscar@yandex.ru

Михаил Алексеевич Афанасенков, кандидат технических наук, инженер АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7, e-mail: afanasenkov.mi@yandex.ru

Urii M. Zubarev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of marine engineering technology Department, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: iuzubarev@mail.ru

Andrey I. Kruglov, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnic str., 29, St. Petersburg 195121, Russian Federation, e-mail: andoscar@yandex.ru

Mikhail A. Afanasenkov, Ph.D. (Eng), engineer JSC "Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology", Promyshlennaya str., 7, St. Petersburg 198095, Russian Federation, e-mail: afanasenkov.mi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.01.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 04.04.2022.

Научная статья

УДК 629.5.03-192.008

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.044>

Мониторинг безопасности эксплуатации объектов морской техники на основе акустико-эмиссионного контроля

А.А. Равин¹ ravinlki@mail.ru, О.В. Хруцкий¹ obx47@mail.ru, А.В. Алексеев¹ 17151@bk.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Значимость метода акустико-эмиссионного контроля (АЭК) по обнаружению и дальнейшему мониторингу опасных развивающихся дефектов в конструкционном материале объектов с целью предотвращения наступления аварийной ситуации в настоящее время вне сомнений. Однако, в практике использование АЭК по-прежнему связано с рядом ограничений, с которыми приходится встречаться как диагностическим, так и инспекционным службам в процессе выполнения работ по оценке безопасности потенциально опасных объектов. В данной работе рассматривается метод назначения численной оценки класса опасности активного источника АЭ на основе специального функционала. Работоспособность предлагаемого метода подтверждена конкретными примерами, дающими основание, по мнению авторов, полагать, что предложенный метод может быть применен как на практике, так и при разработке отраслевых методических документов.

Ключевые слова: мониторинг безопасности эксплуатации объектов, класс опасности активного источника АЭ, динамический ряд АЭ, функция тренда

Для цитирования: Равин А.А., Хруцкий О.В., Алексеев А.В. Мониторинг безопасности эксплуатации объектов морской техники на основе акустико-эмиссионного контроля, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 72—78.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.044>

Monitoring the safety of marine equipment operation based on acoustic emission control

Alexander A. Ravin¹ ravinlki@mail.ru, Oleg V. Khrutsky¹ obx47@mail.ru,

Anatoliy V. Alexseev¹ 17151@bk.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The significance of the acoustic emission control (AEC) method for detecting and further monitoring dangerous developing defects in the structural material of objects in order to prevent the occurrence of an emergency situation is currently out of the question. However, in practice, the use of AEC is still associated with a number of limitations that both diagnostic and inspection services have to meet in the process of performing work on assessing the safety of potentially dangerous objects. In this paper, we consider a method for assigning a numerical assessment of the hazard class of an active AE source based on a special functional. The efficiency of the proposed method is confirmed by specific examples, which, according to the authors, give reason to believe that the proposed method can be applied both in practice and in the development of industry methodological documents.

Key words: monitoring of object operation safety, hazard class of an active AE source, AE dynamic range, trend function.

For citation: Alexander A. Ravin, Oleg V. Khrutsky, Anatoliy V. Alexseev Monitoring the safety of marine equipment operation based on acoustic emission control. Marine intellectual technologies, 2022. № 2 part 2. P. 72—78.

Введение

Конструкционный материал оборудования нефтегазовых комплексов, топливно-энергетических комплексов, объектов морской энерготехники и объектов инфраструктуры портов, в частности нефтеналивных терминалов, в течение ресурсного срока эксплуатации испытывает влияние внешних и внутренних факторов в виде температурных воздействий, длительных статических нагрузок, динамических нагрузок (включая вибрацию) и прочих. В результате комплексного воздействия отдельных факторов, присущих условиям эксплуатации конкретных объектов, возрастает вероятность возникновения и последующего развития дефектов структуры материала сосудов и резервуаров давления, трубопроводов, сильфонов,

термокомпенсирующих элементов и других ответственных силовых металлоконструкций. В связи с этим очевидна и проблема, связанная с обеспечением безопасности эксплуатации соответствующих объектов. Решение данной проблемы осуществляется за счет внедрения передовых инновационных технологий, современных аппаратных средств контроля и управления технологическими процессами на основе алгоритмов сбора и обработки информации в реальном масштабе времени. Одной из приоритетных задач проблемы эксплуатационной безопасности оборудования является организация мониторинга его технического состояния [1-6] и, в частности, оценка состояния конструкционного материала оборудования на

предмет выявления развивающихся дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля (АЭК).

Полученные при АЭК оборудования сведения о месторасположении дефектов и трендах их развития, сопряженных со степенью опасности дефектов позволяют не только оптимизировать сроки проведения технического обслуживания и вывода в ремонт оборудования по критерию минимума затрат, но и снизить вероятность «внезапных» отказов оборудования, приводящих к техногенным авариям.

В данной статье рассмотрен подход к оценке степени активности источников АЭ в процессе мониторинга опасных производственных объектов с учетом рекомендаций [7]. При этом под мониторингом понимается единство четырех взаимосвязанных процедур: индикации технического состояния (собственно диагностики); анализа результатов индикации по выработанным априори алгоритмам; прогнозирования с получением количественных оценок остаточных уровней работоспособности объекта и формирование оптимальной стратегии профилактических или восстановительных работ. Рассматриваемый в статье пример применения АЭК для мониторинга безопасности эксплуатации объектов базируется на экспериментальных данных, полученных в процессе выполнения комплексной НИР «Диагноз», связанной с обоснованием выбора методов диагностирования основных элементов и систем корабельной энергетической установки.

1. Метод определения численного значения класса опасности источника АЭ

При проведении акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга объектов оценивается степень опасности зарегистрированных дефектов конструкционного материала. Всего выделяют 4 класса степени опасности: пассивный, активный, критически активный и катастрофически активный. Определение класса опасности проводится по стандартным критериям, приведенным в нормативном документе ПБ 03-593-03 [7].

Классификацию опасности источников АЭ обычно проводят с использованием двух критериев: амплитудного и локально-динамического.

При применении амплитудного критерия рассчитывают граничное значение допустимой амплитуды сигнала АЭ. Проведение классификации осуществляется путем сопоставления средней амплитуды источника АЭ за время наблюдения и величины допустимой амплитуды. При этом допустимое значение амплитуды зависит от конструкционного материала объекта и определяется по результатам предварительных экспериментов на образцах данного материала.

Локально-динамический показатель основан на степенной зависимости между параметром суммарной АЭ (N), наблюдаемой на некотором временном интервале, и уровнем нагружения объекта (P):

$$N \cong \alpha [P(t)]^n, \quad (1)$$

где N – число зарегистрированных АЭ – событий;

α - константа материала;

P - параметр нагружения;

n – показатель степени.

Следует заметить, что наличие активного источника сопутствующего шума, например

движения рабочей среды, может усложнить анализ регистрации сигналов АЭ при применении данного критерия.

Как видно из выражения (1), локально-динамический критерий характеризует процесс развития дефектов во времени в зависимости от параметра нагружения. Классификация источников АЭ проводится по значению показателя степени n : чем больше значение показателя степени, тем выше класс опасности источника АЭ:

$0 < n < 1$ - источник опасности I класса (пассивный);

$n \approx 1$ - источник опасности II класса (активный);

$0 < n < 6$ - источник опасности III класса (критически активный);

$n \geq 6$ - источник опасности IV класса (катастрофически активный).

Рассмотрим альтернативный метод оценки класса опасности источника АЭ с позиции задачи оптимального управления объектом (в данном варианте – безопасной эксплуатацией объекта) [8]. Данный метод относится к классическим задачам, в частности, изопериметрическим задачам, когда ограничения на управление объектом задаются в форме функционала:

$$\int_{t_0}^{t_k} G(x, u, t) dt = D, \quad (2)$$

где x – переменная состояния объекта;

u – переменная управляющих воздействий;

D – заданное значение;

t_0, t_k – время начала и окончания подачи управляющих воздействий и регистрации переменной состояния объекта.

По характеру начальных и конечных условий функционал (2) может рассматриваться как задача:

- с закрепленными (фиксированными) концами, когда начальное и конечное состояния задаются точками фазового пространства;

- со свободными (подвижными) концами, когда начальное и конечное состояния задаются некоторыми множествами в фазовом пространстве;

- с одним закрепленным и одним подвижным концом, когда одно из состояний (начальное или конечное) задаётся точкой фазового пространства, а другое – множеством.

По времени начала и конца процесса управления:

- со свободным временем, когда либо конечное, либо начальное время не фиксировано.

По виду оптимизирующего функционала:

- с функционалом общего вида, когда ставится произвольная цель оптимизации;

- с функционалом максимального быстродействия, когда цель управления – перевод объекта из одного состояния в другое за кратчайшее время;

- с квадратичным функционалом, когда оптимизирующим функционалом является интеграл от квадратичной функции переменных состояния и управления.

Для предлагаемого метода подходит функционал общего вида с одним закрепленным концом (начальное состояние), одним подвижным концом (конечное состояние) и с нефиксированным конечным временем. К числу таких функционалов относится выражение:

$$\tilde{N}(z) = B / (1 - Az)^2, \quad (3)$$

где z – аргумент и $z = P/Vt$.

Функционал (3) является решением L -интегрального уравнения [9;10] фазовой плоскости $\{N(z), L[N(z)]\}$:

$$N(z) = B + A \cdot L[N(z)] = B + A \left[\int_{z_0}^{z_k} N(z) dz + zN(z) \right] \quad (4)$$

где $L[N(z)]$ – L -интеграл от функции $N(z)$, применяемый в качестве оператора сглаживания динамического ряда $N(z_i), i = \overline{1, k}$;

B и A – коэффициенты, определяющие положение прямой (4) в фазовой плоскости. Численные значения этих коэффициентов находятся методом наименьших квадратов.

L -интеграл (оператор сглаживания) обладает следующими характеристическими свойствами:

– при его вычислении не требуется гладкости функции $N(z)$, а $L[N(z)]$ как функция от z является монотонной по сравнению с исходной реализацией. Данное свойство L -интеграла целесообразно использовать при сглаживании динамического ряда $\{N(z_i)\}_{i=1}^n$ источника АЭ второго класса опасности с целью прогноза развития ситуации.

Функционал (3) не противоречит физическому смыслу процесса развития разрушения конструкционного материала наблюдаемого объекта. Так, при $z = 0, N(z) = B$. Это означает, что имелся некоторый изначальный дефект структуры материала, ставший в последующем инициатором развития процесса разрушения.

При $z = 1/A, N(z) \rightarrow \infty$, что опять же, с физической точки зрения объяснимо: в момент окончательного локального разрушения металла объекта число событий АЭ резко возрастает и счетчик событий аппаратуры переполняется.

Последнее является замечательным свойством функционала (3), т.к. имеется (хотя и ожидаемый) момент времени разрушения объекта и факт «внезапности» исчезает. Таким образом выходит, что при $z \rightarrow 1/A$ объект с развившемся до критического значения дефекте практически исчерпывает 100% запаса работоспособности. при $z = 0,90/A$ будет израсходовано 90% запаса прочности и т.д. (рис.1).

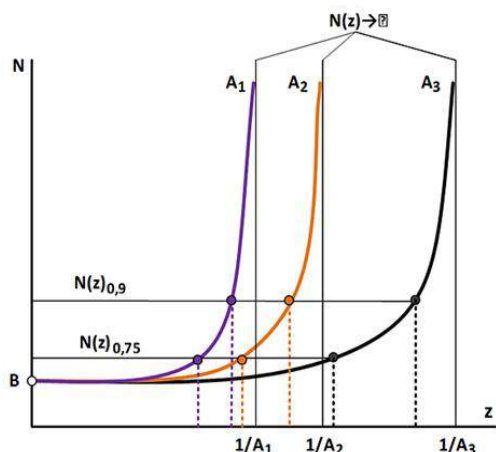


Рис. 1. Иллюстрация назначения уровней работоспособности объекта

2. Примеры применения предлагаемого метода

Рассмотрим пример практического применения функционала (3) на основе результатов работ, выполненных ранее [11;12].

Объектом эксперимента являлись сменные модели трубопроводов из нержавеющей стали 08X18H10T диаметром 75 мм, толщиной стенки 3 мм и длиной 1300 мм.

Модели были выполнены по принципу «труба в трубе». Внешний трубопровод подвергался цилиндрическому нагружению насосом высокого давления в соотношении $P_{max}/P_{min} = 4$ и длительностью цикла нагружения $\Delta t \cong 3$ мин. С целью ускорения развития усталостной трещины на трубопроводах фрезой наносились продольные надрезы-концентраторы V-образной формы.

Испытуемые модели трубопроводов поочередно устанавливались в специально разработанный стенд, имитирующий реальные условия работы некоторых трубопроводных систем корабельной энергетической установки (рис.2).

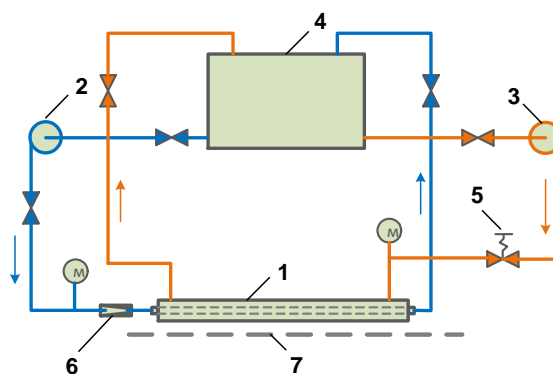


Рис. 2. Гидравлическая схема стенда

1 – исследуемая модель; 2 – насос низкого давления; 3- насос высокого давления; 4 – расходный бак; 5 – автоматический клапан; 6 – турбулизатор; 7 – защитный экран

В качестве информативного параметра развивающейся усталостной трещины металла трубопровода принималось число событий АЭ, зарегистрированных в конце цикла нагружения, которые по амплитуде превышали установленный уровень дискриминации на фоне гидродинамического шума, создаваемого водой, протекающей через турбулизатор по контуру низкого давления со скоростью до 4 м/с (рис.3).

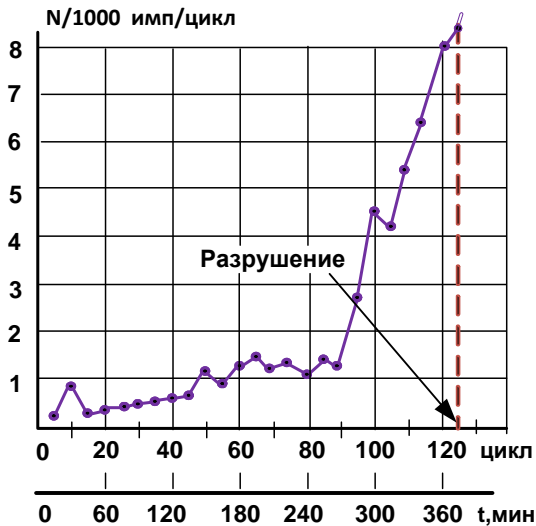


Рис.3. Изменение АЭ при развитии усталостной трещины

Всего было испытано пять моделей трубопроводов с концентраторами глубиной $\delta=0,8...2,2$ мм,

Разгерметизация, в зависимости от размера концентратора, произошла в течение времени $t \approx 380...155$ мин.

На рис.3 представлен результат испытаний одной из моделей трубопроводов с указанием числа событий АЭ в конце каждого пятого цикла нагружения. Из рисунка следует, что начиная с 85-го цикла нагружения ($t \approx 260$ мин) АЭ начала резко расти, и в момент времени $t \approx 375$ мин произошло локальное разрушение трубопровода. При этом счетчик событий АЭ прибора АРКС-02 «переполнился», а последним зарегистрированным значением событий АЭ было значение $N=8347$ имп/цикл.

Возьмем за исходный динамический ряд событий АЭ выборку объемом $\{N(t_i)\}_{i=1}^{13}$ и определим её аппроксимирующую функцию с использованием программы обработки и анализа диагностических данных (рис. 4).

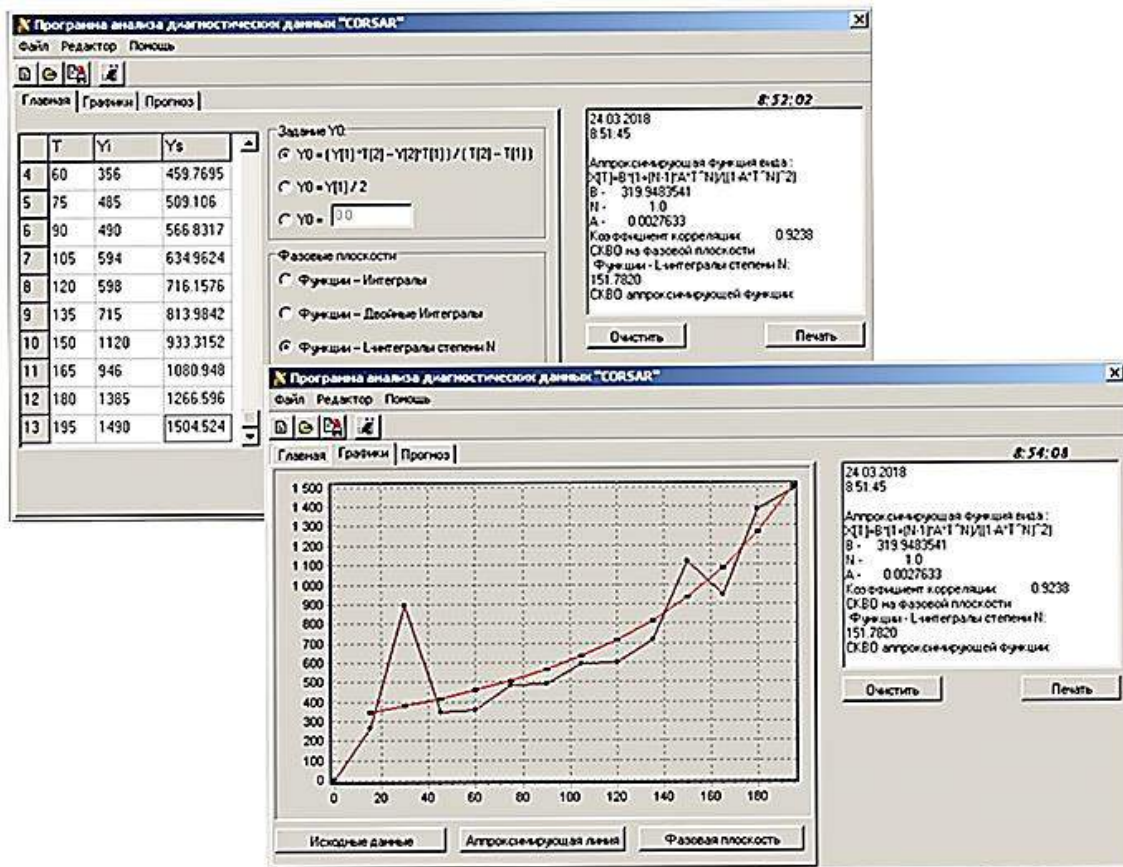


Рис.4. Скриншоты результатов обработки временного ряда АЭ

Изменение АЭ при развитии трещины в концентраторе трубопровода можно представить следующей аппроксимирующей динамический ряд функцией (функцией тренда):

$$\tilde{N}(t) = 320 / (1 - 0,00276t)^2. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции между исходным динамическим рядом событий АЭ $N(t)$ и функцией тренда $\tilde{N}(t)$ при среднем квадратическом отклонении

$\sigma = 152$ соответствует $\rho = 0,9238$, что характеризует наличие сильной статистической связи и, следовательно, функция (5) может быть принята в качестве рабочей для назначения классов опасности источника АЭ модели трубопровода.

Определим значения, устанавливающие зоны принадлежности активности источника АЭ к классам опасности в соответствии с исчерпанием 30, 60 и 90% ресурса:

- источник опасности I класса: $N(t) < (650 \pm 150)$ имп/мин;
- источник опасности II класса: $(650 \pm 150) < N(t) < (2 \cdot 10^3 \pm 150)$ имп/мин;
- источник опасности III класса: $(2 \cdot 10^3 \pm 150) < N(t) < (3,2 \cdot 10^4 \pm 150)$ имп/мин;
- источник опасности IV класса: $N(t) > (3,2 \cdot 10^4 \pm 150)$ имп/мин.

Сравнение вычисленных значений уровней опасности источника АЭ не противоречит результатам эксперимента, представленным на рис.3. Особо следует отметить, что численные значения уровня опасности получены на базе 52% данных динамического ряда АЭ, когда источник АЭ согласно полученным результатам относился ко II классу опасности.

В качестве второго примера, рассмотрим классический эксперимент исследования АЭ.

На рис.5, заимствованном из источника [13], приведена зависимость интенсивности АЭ в функции давления при гидроиспытаниях отсека трубы длиной около 4,0 м, диаметром 3,6 м и толщиной стенки 41,6 мм, изготовленной из стали А-106-В с искусственно созданной трещиной (Hutton P.H. Acoustic emission in metals as an NDT tools. – «Materials Evaluation», 1968, v.26, №7, p.125-129).

В процессе испытаний было установлено, что критерием обнаружения развития трещины может служить резкое повышение интенсивности сигнала акустической эмиссии. На рис.5 представлен тренд экспериментальной функции $\dot{N}(P, t)$, который не идентифицирован математической моделью.

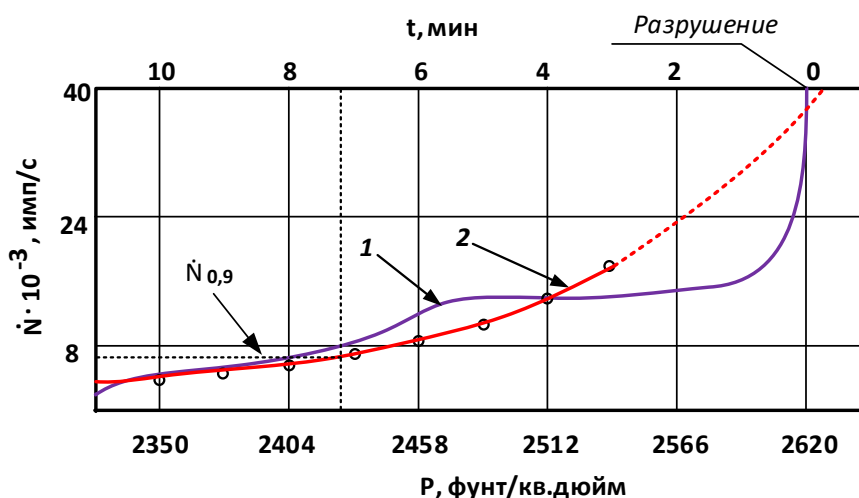


Рис. 5. Интенсивность АЭ в функции давления и времени при гидроиспытаниях отсека трубы: 1 - экспериментальная функция; 2 – аппроксимирующая функция

Восстановление ретроспективы (технический генезис) времени нагружения объекта исследований до $P = 2620$ фунт/кв. дюйм составило примерно $t \cong 104$ мин. Располагая имеющимися результатами интенсивности АЭ в функции времени $\dot{N}(t)$ можно идентифицировать математическую модель.

При идентификации математической модели была взята выборка динамического ряда интенсивности АЭ объемом $\{\dot{N}(t_i)\}_{i=1}^8$, что соответствует нагружению объекта давлением 2539 фунт/кв. дюйм на момент времени $t = 101$ мин.

Обработка данных динамического ряда вышеуказанной программой показала, что изменение интенсивности АЭ в процессе нагружения отсека трубы можно представить следующей математической моделью:

$$\tilde{N}(t) = 66,68 / (1 - 0,00929t)^2. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции между $\dot{N}(t)$ и $\tilde{N}(t)$ при объеме выборки $\{\dot{N}(t_i)\}_{i=1}^8$ составил $\rho = 0,9883$. Определение на основании выражения (6) значения интенсивности АЭ, соответствующего источнику опасности III класса, (исчерпание 90% ресурса) равно:

$$\tilde{N}(t)_{0,9} = 6668 \text{ имп/с} \cong 6700 \text{ имп/с},$$

что не противоречит результатам эксперимента, выполненного в свое время Хаттоном.

Если на основании выражения (6) выполнить задачу технического генезиса (восстановить ретроспективу развития процесса разрушения), то получается, что трещина в металле нагружаемого отсека трубы стала источником АЭ II класса опасности по достижении интенсивности $\tilde{N}(t)_{0,6} \cong 420$ имп/с и, что можно соотнести к времени нагружения отсека трубы $t \cong 65$ мин.

Выводы

В рамках представленной статьи рассмотрен один из возможных методов определения численных значений классов опасности обнаруженных активных источников АЭ конструкционных материалов объектов в процессе мониторинга их технического состояния. Предлагаемый метод, базирующийся на применении функционала с одним закрепленным концом (начальным условием процесса развития локального разрушения конструкционного материала объекта) позволяет своевременно назначить численные значения классов опасности источников АЭ и, тем самым, предотвратить наступление «внезапной» аварийной ситуации на объекте. Работоспособность метода подтверждена двумя

экспериментальными примерами. Авторы надеются, что данная работа найдет отклик среди специалистов по АЭК объектов, а предлагаемый метод будет усовершенствован при обработке других, любезно представленных, динамических

рядов АЭ конкретных объектов. Более подробно практические аспекты безопасности эксплуатации объектов морской техники рассмотрены в работах [14;15; 16].

Литература

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. Тляшева Р.Р., Кузеев И.Р., Чиркова А.Г. Мониторинг степени опасности производственных объектов нефтегазовой отрасли. Уфа: УГНТУ, 2009. 260 с.
3. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. М.: Наука, 2010, 415с.
4. Василенко В.А., Травин С.Я. Мониторинг технического состояния корабельных ядерных энергетических установок. СПб.:ООО «НИЦ «Моринтех»,2006.256 с.
5. Мясников Ю.Н. Надежность и техническая диагностика судовых энергомеханических систем (НТДИКА). СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008. 183 с.
6. Портной А.С., Зуева Е.С. Концепция риска в обеспечении безопасности морского нефтегазового комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2018. 4(42) Т.1. с. 18 – 24.
7. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03). М.: ПИО ОБТ, 2003, 55 с
8. Суевалов Л.Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем. Л.: Судостроение, 1989. 408 с.
9. Соболев Л.Г. Обработка результатов измерений в судостроении. Л.: Изд. ЛКИ, 1983, 47 с.
10. Соболев Л.Г. Операционные методы в задачах идентификации экспериментальных трендов // Автоматика и телемеханика. 1997. №2. С. 100 – 107.
11. Хруцкий О.В., Мясников Ю.Н., Соболев Л.Г. Акустическая эмиссия – метод технического диагностирования // Судостроение. 1980. №9. С. 24-26.
12. Хруцкий О.В., Соболев Л.Г. К вопросу обработки акустико-эмиссионных данных // Дефектоскопия. 1991. №9. С. 79-82.
13. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
14. Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования. Deutschland, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 141 с.
15. Хруцкий О.В. Техническая диагностика: учебник. СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2018. 262 с.
16. Равин А.А. Диагностика судового энергетического оборудования. Deutschland, LAP LAMBERT Academic Publishing RU,2018, 288 с.
17. Алексеев А.В. Технология системного мониторинга и интеллектуальной поддержки управления безопасностью критических объектов /http://istmu.ru/ru/0-72 (дата обращения:10.05.2018).

References

1. Kostyukov V. N. Monitoring of production safety. Moscow: Mashinostroenie, 2002. 224 p.
2. Tlyasheva R. R., Kuzeev I. R., Chirkova A. G. Monitoring of the degree of danger of production facilities of the oil and gas industry. Ufa: USNTU, 2009. 260 p.
3. Bigus G. A., Daniev Yu. F. Technical diagnostics of hazardous production facilities. Moscow: Nauka, 2010, 415s.
4. Vasilenko V. A., Travin S. Ya. Monitoring of the technical condition of shipboard nuclear power plants. SPb.:LLC " SIC "Morintech", 2006.256 p.
5. Myasnikov Yu. N. Reliability and technical diagnostics of ship power-mechanical systems (NTDIKA). St. Petersburg: Krylov Central Research Institute, 2008. 183 p.
6. Portnoy A.S., Zueva E. S. The concept of risk in ensuring the safety of the offshore oil and gas complex // Marine intelligent technologies. 2018. 4 (42) Vol. 1. pp. 18-24.
7. Rules for the organization and conduct of acoustic emission control of vessels, apparatuses, boilers and technological pipelines (PB 03-593-03). Moscow: PIO OBT, 2003, 55 s
8. Suevalov L.F. Handbook of calculations of ship automatic systems. L.: Shipbuilding, 1989. 408 p.
9. Sobolev L.G. Processing of measurement results in shipbuilding. L.:LKI Publishing house, 1983, 47 p.
10. Sobolev L. G. Operational methods in problems of identification of experimental trends // Automation and telemechanics. 1997. No. 2. pp. 100-107.
11. Khrutsky O. V., Myasnikov Yu. N., Sobolev L. G. Acoustic emission-a method of technical diagnostics // Shipbuilding. 1980. No. 9. pp. 24-26.
12. Khrutsky O. V., Sobolev L. G. On the issue of acoustic emission data processing // Defectoscopy. 1991. No. 9. pp. 79-82.
13. Greshnikov V. A., Drobot Yu. B. Acoustic emission. Application for testing materials and products. Moscow: Publishing House of Standards, 1976. 272 p.
14. Ravin A. A., Khrutsky O. V. Forecasting the technical condition of equipment. Deutschland, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 141 c.
15. Khrutsky O. V. Technical diagnostics: textbook. St. Petersburg: Publishing house of SPbGMTU, 2018. 262 p.
16. Ravin A. A. Diagnostics of ship-power equipment. Deutschland, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2018, 288 p.

17. Alekseev A.V. Technology of system monitoring and intellectual support of safety management of critical objects /<http://istmu.ru/ru/0-72> (date of application:10.05.2018)/

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Александрович Равин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ravinlki@mail.ruravinlki@mail.ru

Alexander A. Ravin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ravinlki@mail.ru

Олег Валентинович Хруцкий, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: obx47@mail.ru

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: obx47@mail.ru

Анатолий Владимирович Алексеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: 17151@bk.ru

Anatoliy V. Alexseev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: 17151@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.04.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 16.04.2022.

Научная статья

УДК 678.686: 66.047.3.086.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.045>

Влияние СВЧ-электромагнитного поля на физико-химические процессы, протекающие в эпоксидном клее ДМ-5-65

И.В. Баранец¹ baranets@mail.ru, А.Д. Бобков² sasha_bobkov@mail.ru, А.В. Краснов² clepto@inbox.ru, Ф.Ф. Легуша³ legushaf@yandex.ru, Г.А. Никитин² nikitin_german@mail.ru, С.И. Пугачев² spugachev@bk.ru, Е.Ю. Рытов³ physics_spbmtu@mail.ru

¹Научно-исследовательский институт синтетического каучука, ²Концерн «МПО-Гидроприбор», ³Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Исследовано влияние СВЧ-электромагнитного поля на свойства наполненного эпоксидного промышленного клея ДМ-5-65, применяемого в гидроакустике для изготовления составных электроакустических преобразователей (ЭАП). Приведены результаты морфологических исследований, проводимых методами микроскопического контрастирования, результаты определения краевого угла смачивания клеем серебряного электрода на поляризованной пьезокерамике системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), определения величины удельной плотности отвержденного клея в зависимости от времени воздействия СВЧ-поля и температуропроводности применяемых в экспериментах подложек: металла, вспученного вермикулита, асбоцемента, шамота. Показана возможность регулирования при воздействии СВЧ-поля конечной морфологии, определяющей растекаемость исследуемого клея в процессе изготовления составного ЭАП, посредством варьирования отношения скоростей физического – диспергирование агрегатов неорганического наполнителя системы титаната бария – и химического – отверждение эпоксидной матрицы – процессов.

Ключевые слова: эпоксидный клей, СВЧ-поле, пьезокерамика, составной пьезокерамический преобразователь, морфология, краевой угол смачивания, подложка.

Для цитирования: Баранец И.В., Бобков А.Д., Краснов А.В., Легуша Ф.Ф., Никитин Г.А., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю. Влияние СВЧ-электромагнитного поля на физико-химические процессы, протекающие в эпоксидном клее ДМ-5-65, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 79—86.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.045>

The effect of the microwave electromagnetic field on the physico-chemical processes occurring in the epoxy glue DM-5-65

Irina V. Baranets¹ baranets@mail.ru, Aleksandr D. Bobkov² sasha_bobkov@mail.ru, Aleksey V. Krasnov² clepto@inbox.ru, Fedor F. Legusha³ legushaf@yandex.ru, German A. Nikitin² nikitin_german@mail.ru, Sergey I. Pugachev² spugachev@bk.ru, Evgeny Yu. Rytov³ physics_spbmtu@mail.ru

¹Research Institute of synthetic caoutchouc, St. Petersburg, Russian Federation, ²Concern «SUW – Hidroprigor», St. Petersburg, Russian Federation, ³St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The effect of the microwave electromagnetic field on the properties of the filled epoxy industrial glue DM-5-65, used in hydroacoustics for the manufacture of composite electroacoustic transducers (EAP), is investigated. The results of morphological studies conducted by microscopic contrast methods, the results of determining the edge angle of wetting a silver electrode with glue on polarized piezoceramics of the lead zirconate-titanate system (PZT), determining the specific density of the cured glue depending on the time of exposure to the microwave field and the thermal conductivity of the substrates used in experiments: metal, expanded vermiculite, asbestos cement, chamotte. The possibility of regulating the final morphology under the influence of a microwave field, which determines the spreadability of the adhesive under study during the manufacture of a composite EAP, is shown by varying the ratio of the rates of physical - dispersion of aggregates of the inorganic filler of the barium titanate system – and chemical – curing of the epoxy matrix – processes.

Key words: epoxy glue, microwave field, piezoceramics, composite piezoceramic converter, morphology, wetting edge angle, substrate.

For citation: Irina V. Baranets, Aleksandr D. Bobkov, Aleksey V. Krasnov, Fedor F. Legusha, Sergey I. Pugachev, Evgeny Yu. Rytov, The effect of the microwave electromagnetic field on the physico-chemical processes occurring in the epoxy glue DM-5-65, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 79—86.

Введение

В патенте [1] впервые рассмотрена интенсификация процесса металлизации пьезокерамики серебросодержащими пастами в СВЧ-электромагнитном поле по оригинальной конструктивно-технологической схеме «стартового

диэлектрика». В качестве этого диэлектрика, выполняющего роль подложки, было предложено использовать вспученный вермикулит.

В работе [2] показано, что действие СВЧ-электромагнитного поля на эпоксидный клей ДМ-5-65, реализуемое по схеме «стартового диэлектрика», значительно сокращает

продолжительность процесса его отверждения, не снижая при этом адгезионной прочности соединений адгезив – субстрат, и приводит к существенному уменьшению разброса ее значений. Результаты исследований, представленные в недавней работе [3], показали, что действие СВЧ-поля способствует образованию связей между частицами наполнителей в матрице клея. В последующих экспериментах было установлено, что вспученный вермикулит – не единственный диэлектрик, пригодный для изготовления подложек.

Целью настоящей работы является исследование влияния СВЧ-поля на свойства клея ДМ-5-65 в зависимости от времени действия поля и теплопроводности подложек.

1. Методики исследования

Морфологические исследования проведены с помощью аналитического комплекса, включающего исследовательский микроскоп Leica DM-2500, цветную цифровую камеру высокого разрешения Leica DFC-420, специализированную компьютерную станцию и программное обеспечение Leica Application Suite. Используются методы микроскопического контрастирования: «светлое поле», демонстрирующее различие структурных элементов по оптической плотности, «фазовый контраст» - для обнаружения областей с варьированием химического состава, «скрещенные николи» - для локализации размещения кристаллитов и определения интенсивности их двулучепреломления [4]. Исследования проведены на просвет в диапазоне длин волн от 200 нм до 1200 нм.

Краевой угол смачивания θ определяли методом лежащей капли [5]. Анализ капли производили в рамках теории Юнга-Лапласа [6].

Исследовались навески промышленного клея ДМ-5-65, содержащего в качестве одного из неорганических наполнителей титанат бария, как в исходном состоянии, так и в виде капель на посеребренных поверхностях пьезокерамического элемента (ПКЭ) - поляризованной пьезокерамики ЦТБС-3 в форме диска диаметром 30 мм и высотой 10 мм - после действия СВЧ-поля частотой 2450 МГц, мощностью 700 Вт в течение 5, 10, 30, 45, 60 с. В качестве подложек использовали материалы, характеризующиеся различной теплоемкостью, теплопроводностью и температуропроводностью: металл (М), вспученный вермикулит (ВВ), асбестоцемент (АЦ) и шамот (Ш). В аналогичных условиях готовили «свидетелей»: капли клея на бумаге плотностью 80 г/м² обрабатывали в СВЧ-поле и далее нагревали в электропечи сопротивления в течение 48 часов при температуре +65°C. В экспериментах варьировали время воздействия СВЧ-поля и материал подложки.

Удельную плотность δ клея определяли методом гидростатического взвешивания.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Физико-химической характеристикой, в большой степени определяющей качество склеивания

элементов ЭАП, является растекаемость клея по поверхности ПКЭ. Количественно она оценивается величиной угла θ , равной, по нашим измерениям, $86 \pm 6^\circ$ для исходного промышленного клея ДМ-5-65. Изменение θ в зависимости от времени действия СВЧ-поля и природы подложек представлено в таблице 1.

Анализ табличных данных показывает следующее:

1. Действие СВЧ-поля приводит к снижению θ для всех образцов при временах действия (10, 30, 45, 60) с. Следовательно, наличие поля облегчает растекание клея по поверхности пьезокерамики.

2. Зависимость величины θ от времени действия СВЧ-поля носит экстремальный характер. Положение минимума θ зависит от природы подложки. Так, для подложки из вспученного вермикулита минимальный угол θ достигается при действии СВЧ-поля в течение 30 с, а из шамота – в течение 45 с.

3. Природа подложек определяет скорость нагрева клея в СВЧ-поле. Скорость минимальна и колеблется в узком диапазоне: (0,97- 1,30)°C/с при использовании вспученного вермикулита, характеризующегося минимальным в ряду коэффициентом теплопроводности, равным 0,1 Вт/(м·град).

4. Установлена обратная корреляция значений скоростей нагрева в СВЧ-поле материалов подложек и их коэффициентов теплопроводности. Минимальный нагрев в СВЧ-поле (скорость нагрева (0,07 – 0,2) °C/с) обеспечил шамот, обладающий максимальным в ряду коэффициентом теплопроводности, равным 0,85 Вт/(м·град). Коэффициент теплопроводности асбестоцемента обладает промежуточным в ряду значением 0,35 Вт/(м·град).

5. Отсутствует прямая корреляция между θ и скоростью нагрева клея на посеребренной поверхности ПКЭ в СВЧ-поле. Этим не подтверждается решающая роль нагрева клея в улучшении его растекаемости под действием СВЧ-поля.

Для выяснения природы процессов, индуцированных в клее действием СВЧ-поля, приведем результаты морфологических исследований клея в зависимости от времени действия поля и природы подложек.

До действия СВЧ-поля (рисунок 1) дисперсные неорганические наполнители в матрице клея присутствуют в виде агрегатов размерами (3,5...168,0) мкм. Агрегаты окружены дисперсионно окрашенными слоями матрицы толщиной (0,4...12,8) мкм, что указывает на изменение химического состава матрицы вблизи частиц наполнителя (рисунок 1а). Методом скрещенных николей в клее обнаружены преимущественно ромбические кристаллы размерами (0,9...20,8) мкм (рисунок 1б). По данным [7], их образование обусловлено кристаллизацией димеров и тримеров эпоксидных молекул, происходящей на зародышах, в нашем случае – на частицах неорганических наполнителей. В исходном клее кристаллические области ромбической формы содержат зерна диаметром (1,0...1,5) мкм.

Таблица 1.

Зависимость скорости нагрева и краевого угла смачивания клея ДМ-5-65 на посеребренной поверхности ПКЭ от времени действия СВЧ-поля и природы подложки

Партия	Подложки	Действие СВЧ-поля, с	Θ, град	Скорость разогрева клея и подложек, °C/с			
				ПК	ВВ	АЦ	Ш
1	М + ПК + ВВ	10	68	1,3	2,0		
2	М + ПК + АЦ	10	59	4,1		0,4	
3	М + ПК + Ш	10	65	2,4			0,1
1	М + ПК + ВВ	30	57	0,97	1,8		
2	М + ПК + АЦ	30	-	3,7		2,9	
3	М + П К+ Ш	30	67	2,8			0,1
2	М + ПК + ВВ	45	73	1,1	2,5		
2	М + ПК + АЦ	45	82	2,9		2,2	
3	М + ПК + Ш	45	49	2,5			0,07
1	М + ПК + ВВ	60	66	1,06	3,0		
2	М + ПК + АЦ	60	80	2,7		1,7	
3	М + ПК + Ш	60	70	2,1			0,2

Примечание: М – металл (серебро); ПК – пьезокерамика; ВВ – вспученный вермикулит; АЦ – асбоцемент; Ш – шамот

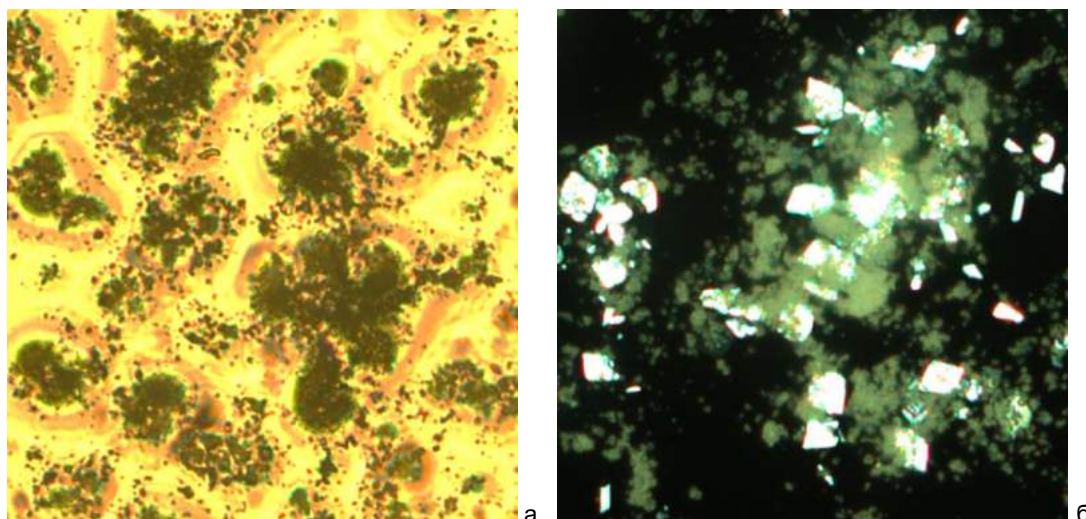


Рис. 1. Микрофотографии клея ДМ-5-65.

Режимы: а – фазовый контраст, б – скрещенные николи.
Размер кадров: а – 200 мкм × 200 мкм; б – 100 мкм × 100 мкм.

Анализ экспериментальных данных показал, что действие СВЧ-поля обуславливает диспергирование агрегатов неорганических наполнителей клея. Уровень диспергирования, размер кристаллических образований и интенсивность двулучепреломления в матрице клея под действием поля варьируются в зависимости от материала подложек.

Изменения морфологии клея после действия СВЧ-поля при использовании подложки из шамота представлены на рисунке 2. Максимальные размеры агрегатов наполнителей снизились до 52,0 мкм после 10 с действия поля и до 21,2 мкм при действии поля в течение 30 с. Одновременно размеры кристаллитов в клее, находившиеся в диапазоне (2,2...18,2) мкм после 10 с действия поля, уменьшились до (1,1...13,0) мкм после 30 с его действия. Интенсивность двулучепреломления кристаллитов уменьшилась симбатно с увеличением времени действия поля (сравните рисунок 1б с рисунками 2 б, г).

Влияние подложки из вспученного вермикулита на эволюцию морфологии клея ДМ-5-65 иллюстрирует рисунок 3. Видно, что под влиянием поля агрегаты наполнителей разрыхляются. При увеличении времени действия поля снижается концентрация крупных (10...20) мкм кристаллитов, содержащих оксиды, и возрастает доля кристаллитов диаметром менее 3 мкм. Преобладающими в клее становятся сферические структуры, а при действии поля в течение 60 с – игольчатые кристаллические образования толщиной (0,5...0,75) мкм. Следовательно, действие СВЧ-поля на клей в течение 10 с или 30 с при данной подложке сопровождается последовательным диспергированием агрегатов неорганического наполнителя и снижением размеров кристаллитов. Увеличение времени действия поля до 60 с сопровождается существенным снижением двулучепреломления в матрице и образованием игольчатых структур.

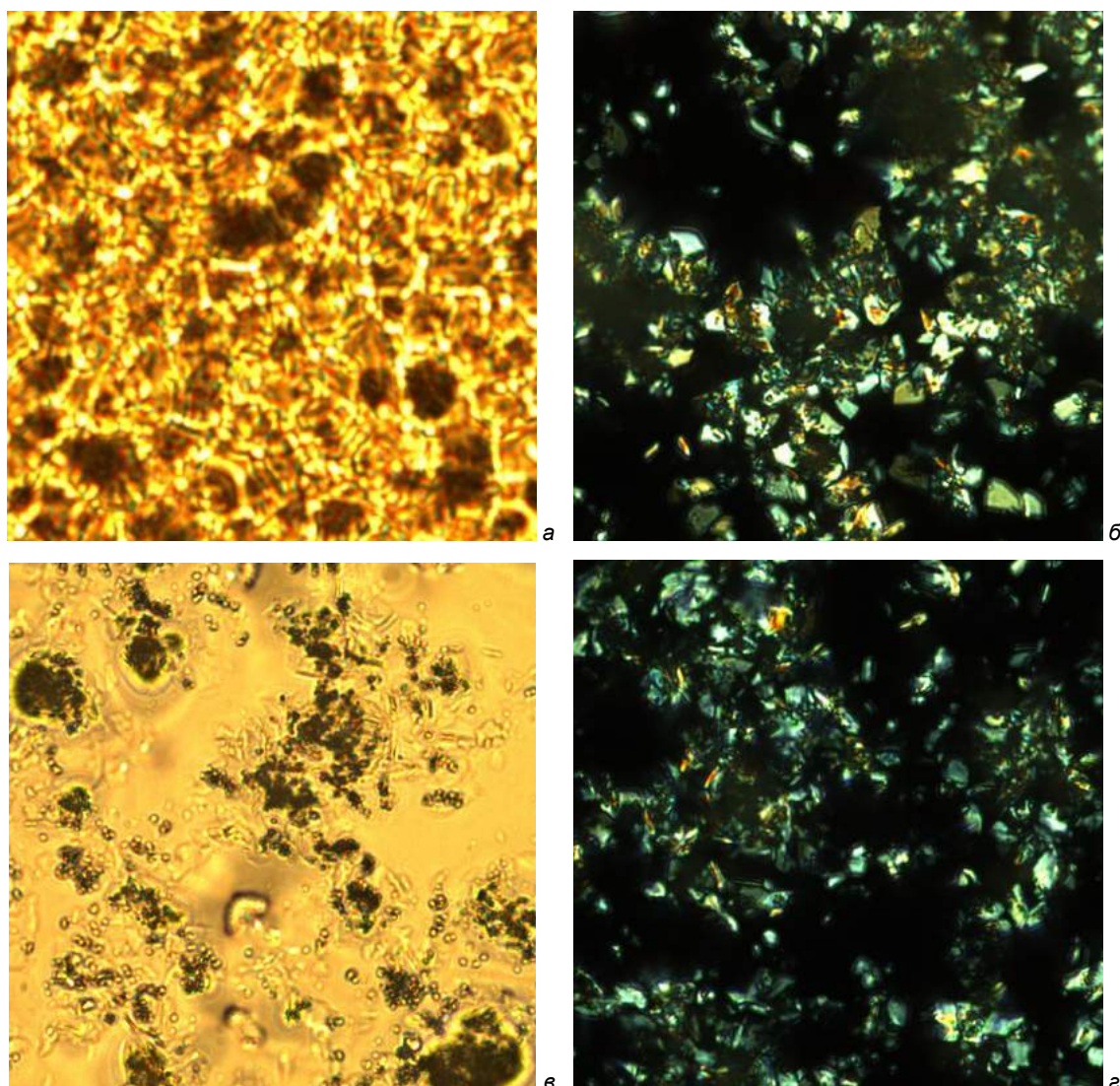


Рис. 2. Микрофотографии клея на поверхности посеребренной пьезокерамики после действия СВЧ-поля; подложка – шамот. Время действия: а, б – 10 с; в, г – 30 с. Режимы: а – светлое поле; в – фазовый контраст; б, г – скрещенные николи. Размер кадров: а – 200 мкм × 200 мкм; б, в, г – 108 мкм × 108 мкм.

Согласно [8,9], эпоксидная смола ЭД-20 отверждается по двум механизмам: 1) медленный топокинетический процесс с образованием кристаллической фазы эпоксиполимера на зародышах кристаллизации (ди- или тетрамерный полимер) и 2) быстрое формирование аморфной стеклофазы при степенях полимеризации порядка 6...100 после действия СВЧ-поля в течение (20...30) с. Микрофотографии на рисунке 3 г свидетельствуют о вероятной смене механизма отверждения матрицы клея при 60 с действия СВЧ-поля для подложки из вспученного вермикулита.

Основные результаты влияния СВЧ-поля на морфологию клея при использовании в качестве подложки асбестоцемента представлены на рисунке 4. Эволюция морфологии клея с увеличением длительности действия поля существенно отличается от представленной на рисунках 2 и 3. Так, максимальное в ряду разрыхление агрегатов наполнителей и аморфизация матрицы установлены

при 10 с действия поля (рисунки 4 а, б). Эти параметры морфологии соответствуют минимальному в ряду значению θ . Увеличение времени действия поля сопровождается ростом размеров агрегатов: частицы наполнителей сближаются (рисунок 4 г) и, далее, формируют микрофазовые области размерами (7,2...88,4) мкм (рисунок 4 е), что сопровождается ухудшением растекаемости клея (θ растет, таблица 1). После 30 с действия поля клей содержит образовавшиеся на зернах диаметром 0,9 мкм кристаллы размерами (12,0...25,9) мкм (рисунок 4 в), а при 45 с действия поля - не содержит кристаллов с интенсивным двулучепреломлением (рисунок 4 д). Это указывает на быстрое отверждение эпоксидного связующего с образованием аморфной матрицы.

Таким образом, исследование морфологии клея ДМ-5-65 до и после его обработки СВЧ-полем в течение (10,30,45,60) с показало, что действие поля сопровождается независимыми физическими и

химическими процессами: диспергирование ассоциатов неорганических наполнителей, кристаллизация димеров и тримеров эпоксидных молекул на частицах наполнителей, образование связей между структурными элементами матрицы. Интенсивность процессов диспергирования

наполнителей и отверждения в матрице возрастает с увеличением времени выдержки клея в СВЧ-поле. При этом отношение скоростей приводимых процессов определяет конечную морфологию клея и его способность растекаться по поверхности, что отражается в величине θ .

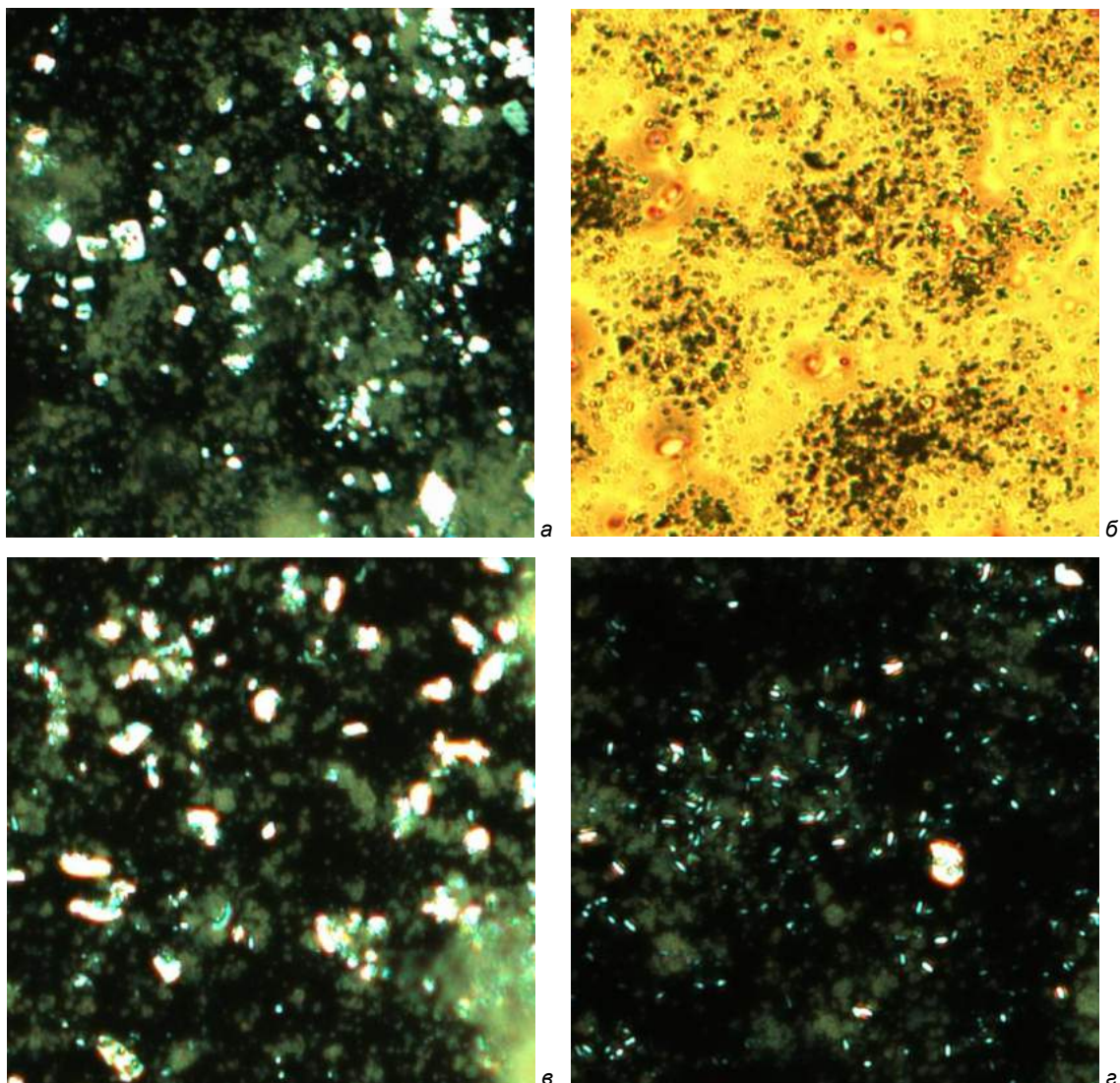


Рис. 3. Микрофотографии клея на посеребренной поверхности пьезокерамики после действия СВЧ-поля; подложка – вспученный вермикулит. Время действия: а – 10 с, б – 30 с, в – 45 с, г – 60 с. Режимы: а, в, г – скрещенные николи, б – фазовый контраст. Размер кадра: а, в, г – 100 мкм × 100 мкм; б – 200 мкм × 200 мкм.

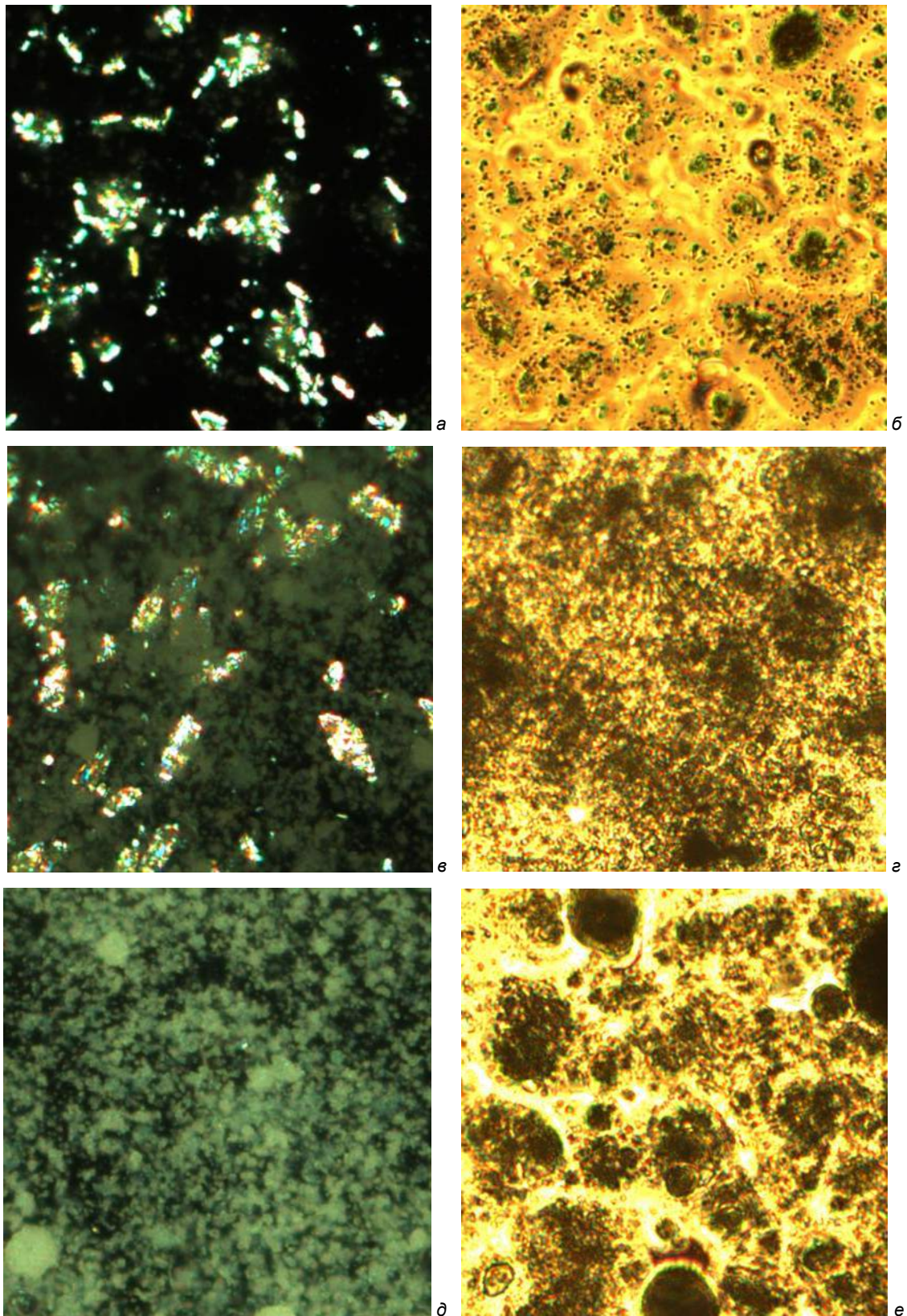


Рис. 4. Микрофотографии клея на посеребренной поверхности пьезокерамики после действия СВЧ-поля; подложка – асбоцемент. Длительность действия поля: а, б – 10 с; в, г – 30 с; д, е – 45 с. Размер кадра: а, в, д – 100 мкм × 100 мкм; б, г, е – 200 мкм × 200 мкм. Режимы: а, в, д – скрещенные николи; б, г, е – фазовый контраст.

Надежность склеивания элементов составных электроакустических преобразователей в значительной степени зависит от структуры

вулканизационной сетки клея ДМ-5-65. Количественной мерой этой характеристики может служить удельная плотность отвержденного клея δ .

В таблице 2 представлено изменение величины δ «свидетелей» в зависимости от времени действия СВЧ-поля и природы используемых подложек.

Из таблицы 2 следует:

1. Динамика изменения δ от времени действия СВЧ-поля зависит от природы подложек: функция выходит на плато после 30 с для вспученного вермикулита, экстремальна с верхней критической точкой для асбоцемента либо с нижней критической точкой для шамота.

2. Увеличение δ отвержденного клея, индуцированное СВЧ-полем, обнаружено для подложки из шамота (10,30,45,60) с и вспученного вермикулита (30,45,60) с.

3. Не обнаружено увеличения δ клея под действием СВЧ-поля для подложек из асбоцемента (10,30,45) с и вспученного вермикулита (10 с). При действии СВЧ-поля в течение 60 с величина δ для подложки из асбоцемента ниже, чем у исходного образца.

Таблица 2.

Зависимость δ «свидетелей» от времени действия на клей СВЧ-поля и от материала подложек

Свидетель + подложки	Действие СВЧ-поля, с	δ , г/см ³
С + ВВ + М	10	2,29 ± 0,05
С + АЦ + М	10	2,23 ± 0,02
С + Ш + М	10	2,49 ± 0,01
С + ВВ + М	30	2,36 ± 0,04
С + АЦ + М	30	2,27 ± 0,03
С + Ш + М	30	2,30 ± 0,04
С + ВВ + М	45	2,34 ± 0,04
С + АЦ + М	45	2,25 ± 0,03
С + Ш + М	45	2,30 ± 0,02
С + ВВ + М	60	2,36 ± 0,02
С + АЦ + М	60	1,86 ± 0,04
С + Ш + М	60	2,50 ± 0,04
Кисх	0	2,24 ± 0,02

Примечание: С - свидетель; М – металл (дно СВЧ- печи); Кисх – исходный клей.

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что СВЧ-электромагнитное поле индуцирует в наполненном эпоксидном клее ДМ-5-65 два процесса: физический – диспергирование агрегатов неорганического пьезокерамического наполнителя, и химический – облегчение формирования связей в эпоксидной матрице вследствие снижения

энергетического барьера реакций отверждения. Скорость каждого процесса определяется не только временем действия СВЧ-поля, но и теплопроводностью применяемых подложек. Конечная морфология и растекаемость клея по поверхности посеребренной пьезокерамики – зависят от соотношения скоростей физического и химического процессов.

Литература

1. Патент РФ № 2256634 Способ металлизации пьезокерамических элементов / Бернштейн Л.А, Легуша Ф.Ф. и др. Оpubл. 20.07.2005. Бюл. № 20.
2. Баранец И.В., Краснов А.В., Легуша Ф.Ф. и др. Отверждение эпоксидного клея в СВЧ-электромагнитном поле / МИТ. № 3(37). Т. 3. 2017. С. 82-88.
3. Баранец И.В., Бобков А.Д., Гайдукова Л.В. и др. Влияние технологии отверждения на морфологию и физические характеристики эпоксидного клея ДМ-5-65 / МИТ. № 4(50). Т. 3. 2020. С 184-188.
4. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера. 2005. – 304 с.
5. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир. 1979. – 568 с.
6. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия. 1976.–232 с.
7. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. Пер. с англ. под ред. Н.В. Александрова. – М.: Энергия. 1973. – 415 с.
8. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы / Вестник СГТУ. 2006. № 4(19). Вып. 4. С. 85-89.
9. Дмитриев Ю.К., Далиев Р.Р., Абакчева Е.М., Исламутдинова А.А. Исследование процесса нетеплового модифицирующего СВЧ-воздействия на полимерные материалы / Башкирский химический журнал 2012. Т. 19. № 1. С. 203-206.

References

1. Patent RF № 2256634 Sposob metallizacii p'ezokeramicheskikh elementov / Bernshtejn L.A, Legusha F.F. i dr. Opubl. 20.07.2005. Byul. № 20.
2. Baranec I.V., Krasnov A.V., Legusha F.F. i dr. Otverzhdenie epoksidnogo kleya v SVCH-elektromagnitnom pole. MIT. № 3(37). T. 3. 2017. S. 82-88.
3. Baranec I.V., Bobkov A.D., Gajdukova L.V. i dr. Vliyanie tekhnologii otverzhdeniya na morfologiyu i fizicheskie harakteristiki epoksidnogo kleya DM-5-65. MIT. № 4(50). T. 3. 2020. S 184-188.
4. Panteleev V.G., Egorova O.V., Klykova E.I. Komp'yuternaya mikroskopiya. M.: Tekhnosfera. 2005. 304 s.

5. Adamson A. Fizicheskaya himiya poverhnostej. M.: Mir. 1979. 568 s.
6. Summ B.D., Goryunov YU.V. Fiziko-himicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya. M.: Himiya. 1976. 232 s.
7. Li H., Nevill K. Spravochnoe rukovodstvo po epoksidnym smolam. Per. s angl. pod red. N.V. Aleksandrova. M.: Energiya. 1973. 415 s.
8. Kalganova S.G. Vliyaniye SVCH elektromagnitnogo polya na kinetiku otverzheniya epoksidnoj smoly. Vestnik SGTU. 2006. № 4(19). Vyp. 4. S. 85-89.
9. Dmitriev YU.K., Daliev R.R., Abakcheva E.M., Islamutdinova A.A. Issledovanie processa neteplovogo modifiziruyushchego SVCH-vozdeystviya na polimernye materialy. Bashkirskij himicheskij zhurnal 2012. T. 19. № 1. S. 203-206.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ирина Владимировна Баранец, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт синтетического каучука, 198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, 1, e-mail: baranets@mail.ru

Irina V. Baranets, Ph.D. (Eng), the leading Researcher, Research Institute of synthetic caoutchouc, Gapsalskaya, 1, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: baranets@mail.ru

Александр Дмитриевич Бобков, инженер-технолог 1-ой категории Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: sasha_bobkov@mail.ru

Aleksandr D. Bobkov, engineer, «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: sasha_bobkov@mail.ru

Алексей Владимирович Краснов, заместитель начальника отдела, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: clepto@inbox.ru

Aleksey V. Krasnov, the Head of Department, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: clepto@rambler.ru

Федор Федорович Лёгуша, доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: legushaf@yandex.ru

Fedor F. Legusha, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: legushaf@yandex.ru

Герман Анатольевич Никитин, инженер-технолог 1 категории, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: nikitin_german@mail.ru

German A. Nikitin, Engineer, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: nikitin_german@mail.ru

Сергей Иванович Пугачев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Концерн «МПО-Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: spugachev@bk.ru

Sergey I. Pugachev, Dr. Sci. (Eng), Professor, the leading Researcher, Concern «SUW – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij, 24, St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: spugachev@bk.ru

Евгений Юрьевич Рытов, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Evgeny Yu. Rytov, Ph.D. (Eng), the associate professor of department of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 24.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 30.05.2022.

Научная статья

УДК 620.193.81

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.046>

Исследование антикоррозионного поведения низкоуглеродистой стали в средах с СРБ в присутствии некоторых производных фенотиазина

О.А. Евтуховская¹ olesya.evtuhovsk@mail.ru, М.А. Агиевич¹ agievichmaria@mail.ru,

К.А. Агапов² perzovochka@mail.ru, М.А. Жданова² marina.zhdanova.1998@mail.ru,

А.А. Грибанькова² Gribankova@smtu.ru

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Исследовано влияние замещенных фенотиазина на процесс замедления микробиологической коррозии, инициированной сульфатредуцирующими бактериями (СРБ). Исследовано воздействие трех органических соединений (ОС) на бактериальные клетки СРБ. Установлены зависимости защитных эффектов и скорости коррозии образцов стали от строения и концентраций ОС гравиметрическим методом анализа, а также произведена дополнительная оценка ингибирующего действия методом электрохимической импедансной спектроскопии, снятия поляризационных кривых и сканирующей электронной микроскопии поверхности образцов. Исследованы параметры водно-солевой среды с СРБ и введенными в нее ОС. Установлено влияние ОС – производных фенотиазина на бактериальный титр СРБ. Рассчитаны коэффициенты лиофильности и обнаружена способность исследованных органических веществ проникать через белковую оболочку бактериальных клеток и воздействовать на их жизнедеятельность.

Ключевые слова: Бициды, ингибиторы коррозии, сульфатредуцирующие бактерии, микробиологическая коррозия, питтинговая коррозия, СЭМ.

Для цитирования: Евтуховская О.А., Агиевич М.А., Агапов К.А., Жданова М.А., Грибанькова А.А. Исследование антикоррозионного поведения низкоуглеродистой стали в средах с СРБ в присутствии производных фенотиазина. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 87—93.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.046>

Study of anti-corrosion behavior low carbon steel in medium with SRB-in the presence some of phenothiazine derivatives

Olesya A. Evtukhovskaya¹ olesya.evtuhovsk@mail.ru Maria A. Agievich¹ agievichmaria@mail.ru,

Konstantin A. Agapov² perzovochka@mail.ru, Marina A. Zhdanova² marina.zhdanova.1998@mail.ru,

Anzhela A. Gribankova² Gribankova@smtu.ru

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, ²St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The effect of phenothiazine derivatives on the process of slowing down microbiological corrosion initiated by sulfate-reducing bacteria (SRB) has been investigated. The effect of three organic compounds (OC) on bacterial cells of SRP was studied. The dependences of the protective effects and corrosion rate of steel samples on the structure and concentrations of OC by gravimetry were established, and an additional assessment of the inhibitory effect by electrochemical impedance spectroscopy, removal of polarization curves and scanning electron microscopy of the samples were made. The parameters of the water-salt medium with SRP and OS introduced into it were studied. The effect of OS - phenothiazine derivatives on the bacterial titer of CRP was established. The lipophilicity coefficients were calculated and the ability of the studied organic substances to penetrate through the protein coat of bacterial cells and affect their vital activity was found.

Key words: biocides, corrosion inhibitors, sulfate-reducing bacteria, microbiologically influenced corrosion, pitting, SEM, corrosion rate, biocide, polarization, impedance.

For citation: Olesya A. Evtukhovskaya, Maria A. Agievich, Konstantin A. Agapov, Marina A. Zhdanova, Anzhela A. Gribankova, Study of anti-corrosion behavior low carbon steel in medium with SRB-in the presence some of phenothiazine derivatives. 2022. № 2 part 2. P. 87—93.

Введение

Теоретические предпосылки, необходимые для успешного исследования, внедрения и последующего применения веществ, замедляющих коррозию, созданы еще в середине прошлого века [1]. в качестве полезного конструкционного материала сталь находит свое применение в широком диапазоне сфер деятельности человека, поэтому, данному направлению посвящено большое количество работ, что свидетельствует

о повышенном научном и прикладном интересе к данной тематике. Микробиологическая коррозия, является основной причиной более 50% случаев коррозионных разрушений. Наряду с микологической, наиболее активное участие принадлежит бактериальной коррозии. СРБ являются основной группой бактерий, участвующих в микробиологической коррозии.

Метод применения единичных органических соединений и в присутствии синергетических добавок, в качестве замедлителей процесса

микробиологической коррозии, так же не нов. Однако ассортимент веществ, нашедших свое применение в качестве средств, замедляющих коррозионный процесс, постоянно расширяется, о чем свидетельствует появление новых научных публикаций и патентов. Известно, что основная доля веществ, повышающих устойчивость металлов к коррозионным изменениям, по своей природе являются органическими соединениями. Связь между структурой и эффективностью замедления или подавления коррозионного процесса берет свое начало от знаний, накопленных в органической химии. Результатом воздействия веществ на кинетику коррозионного процесса может быть уменьшение площади активной поверхности металла, либо изменение энергии активации. Иначе говоря, тем или иным образом он всегда направлен на изменение состояния защищаемой поверхности [2,3]. Универсализм ингибиторов характеризуется тем, что они не только снижают общую скорость коррозии и уровень локального поражения материалов, но и являются эффективными бактерицидами, прежде всего, по отношению к сульфатредуцирующим бактериям. Такие добавки уже в малых концентрациях позволяют не только эффективно бороться с собственно коррозией металлического оборудования, но и с его наводороживанием [4]. Фенотиазин и некоторые его производные, в зависимости от химического строения широко используются в медицинской практике как транквилизаторы, антидепрессанты, антигистаминные средства [5]. Иные известны как группа красителей: Метиленовый синий, Азур А, Азур С, Толуидиновый синий, нашедшие свое применение для лечения локализованной раневой инфекции человека, при проведении фотодинамической терапии [6]. Анализ литературных источников показал, что органические соединения данного ряда являются мало изученными с позиции влияния их на коррозионный процесс и поведение сульфатредуцирующих бактерий. По мнению исследователей, основным видом среди сульфатредуцирующих бактерий, характеризующихся продуцированием большого количества сероводорода и обладающих наибольшей устойчивостью к действию веществ, замедляющих коррозионный процесс, являются бактерии рода *Desulfovibrio desulfuricans*.

Методика и материалы

В данной работе исследовано влияние на процесс микробиологической коррозии, инициированной сульфатредуцирующими бактериями, трех производных фенотиазина (рисунок 1).

В настоящих коррозионных испытаниях использованы образцы низкоуглеродистой стали марки Ст.3, компонентный состав которой до начала коррозионных испытаний оценивали методом электронной сканирующей микроскопии: Fe 92,943 вес.%, Al 0,750 вес.%, С 6,307 вес.%. Образцы стали перед коррозионными испытаниями предварительно очищали от окислов, обезжиривали, облучали в УФ камере и взвешивали.

Накопительную культуру сульфатредуцирующих бактерий выделяли и культивировали путем многократного пересева из образца пластовой воды. Для этого отбирали пробы оборотной воды,

умягченной в равных долях сырой артезианской водой. Культивацию проводили на среде Постгейта «Б», которую после приготовления кипятили и для достижения анаэробных условий быстро охлаждали. Исследование процессов жизнедеятельности бактерий и механизма действия трех производных фенотиазина, проводили в термодинамической системе закрытого типа «образцы стали марки Ст.3 /среда Постгейта «Б»/ бактериальные клетки». в пробирки, содержащие описанную выше термодинамическую систему, добавляли испытуемые органические соединения в количествах, соответствующих минимальной концентрации 3,0 мМоль·л⁻¹. Сравнение проводили относительно абиотической контрольной системы. Изменение параметров исследуемых термодинамических систем оценивали под действием вводимых концентраций производных фенотиазина следующего строения:

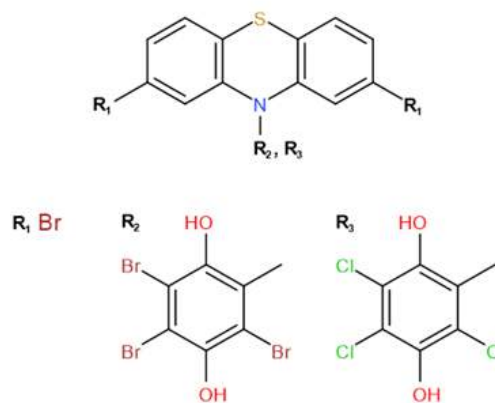


Рис. 1 Структуры молекул исследуемых органических соединений (Структуры молекул, содержащие в составе заместители R₁, R₂, R₃ обозначены как OC1, OC2 и OC3 соответственно)

Взаимосвязь структура - свойства

Центром внимания многочисленных исследований в настоящее время является оценка соотношения структура-свойства органических соединений. Анализ публикаций, позволяет судить об имеющейся корреляции между строением молекул и экспериментально подтвержденной эффективностью их ингибирующего действия. Можно предположить, что присутствие в структуре исследуемых органических соединений гетероатомов, таких как азот и сера, а также ароматических колец способствует усилению адсорбции данных ОС на поверхности образцов стали [8-10]. Кроме того, наличие в структуре фенильных радикалов, имеющих структурное сродство, позволит активно регулировать бактериальную активность. Согласно существующим литературным данным, ионы хлора могут оказывать двойственное влияние на коррозионное поведение металлов. Хлорид-ионы могут выполнять функции ингибиторов и активаторов растворения железа. Известно [11-13], что немаловажное значение имеет наличие сродства органического соединения к другим органическим веществам, определяемое липофильностью. С целью определения предполагаемой степени воздействия испытуемого

соединения на бактериальные клетки, были рассчитаны коэффициенты липофильности (гидрофобности) испытуемых ОС. в системе н-октанол/вода их значения составили: ОС1 +5,58; ОС2 +7,48; ОС3 +7,08. Данные значения указывают на способность испытуемых органических соединений проникать через белковую оболочку бактериальных клеток. Исходя из совокупности факторов, включающих в себя особенности молекулярного строения испытуемых производных фенотиазина и высокие значения коэффициента липофильности, можно в той или иной степени говорить об их влиянии на бактериальную активность клеток.

В микромире, где источники углерода отсутствуют, СРБ (SRB) формирует механизмы для извлечения питательных веществ из корродирующей стали. Электронный перенос между сульфатредуцирующими бактериями и поляризованными электродами изменяет коррозионное поведение стали в средах, инокулированных СРБ. Для оценки скорости протекания коррозионного процесса и защитных свойств испытуемых ОС1, ОС2, ОС3 применяли методы гравиметрического анализа, электрохимических исследований, анализа состояния поверхности образцов. Результат испытаний оценивали относительно контрольных систем с отсутствием СРБ (SRB).

Коррозионное поведение образцов стали

Коррозионные испытания образцов стали в пробах, содержащих исследуемые ОС уже в минимальной концентрации 3,0 ммоль·л⁻¹ показали, что в течение 168 часов происходит изменение pH среды. Во всех испытуемых системах, это есть следствие совокупности факторов: накопления продуктов метаболизма, увеличение или сокращение численности, что ведет к изменению использования сульфатредуцирующими бактериями растворенного водорода в качестве электронного медиатора для переноса электронов к поверхности металла, где происходит их адсорбция и разряд:



Данный процесс носит циклический характер [14] и вызывает изменения уровня pH. Скачкообразное изменение pH в абиотической среде являлось результатом вызванным метаболической активностью СРБ. В контрольной пробе регистрировали смещение значений pH коррозионной среды в соответствии с жизненным циклом бактериальных клеток в первые семь суток. Изменение pH в сторону нейтральных значений свидетельствует о закислении среды в ходе накопления сероводорода и органических кислот и иных продуктов бактериальной активности.

Данный процесс носит циклический характер [14] и вызывает изменения уровня pH. Скачкообразное изменение pH в абиотической среде являлось результатом вызванным метаболической активностью СРБ. в контрольной пробе регистрировали смещение значений pH коррозионной среды в соответствии с жизненным циклом бактериальных клеток в первые семь суток. Изменение pH в сторону нейтральных значений свидетельствует о закислении среды в ходе

накопления сероводорода и органических кислот и иных продуктов бактериальной активности.

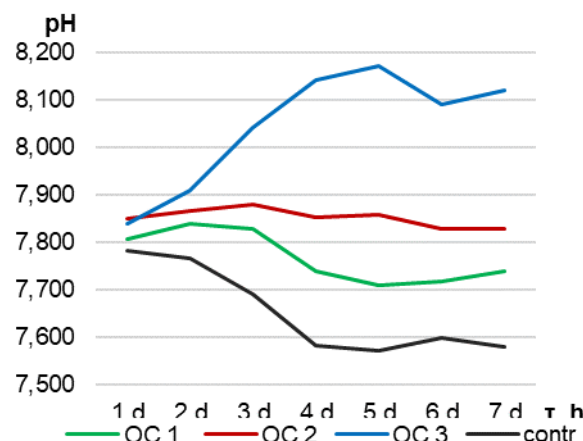


Рис. 2 Изменение показателей pH во времени коррозионных испытаний в средах с испытуемыми ОС

В пробах ОС1 и ОС2 регистрировали незначительное смещение значений pH. В пробах с ОС3 значения смещались в сторону щелочных значений значительно в сравнении с пробами остальных испытуемых соединений. Принимая во внимание различия в строении исследуемых производных, характер заместителей, различное влияние на бактериальные клетки приводит к снижению уровня метаболической активности в пробах с ОС1, ОС2 и ОС3 и отражается в целом на составе продуктов метаболизма и их концентрациях.

С целью всесторонней оценки коррозионного поведения, отслеживали изменение таких показателей, как потенциал образцов и численность бактериальных клеток методом прямого подсчета в камере Горяева. Динамика изменения представлена на рисунке 3.

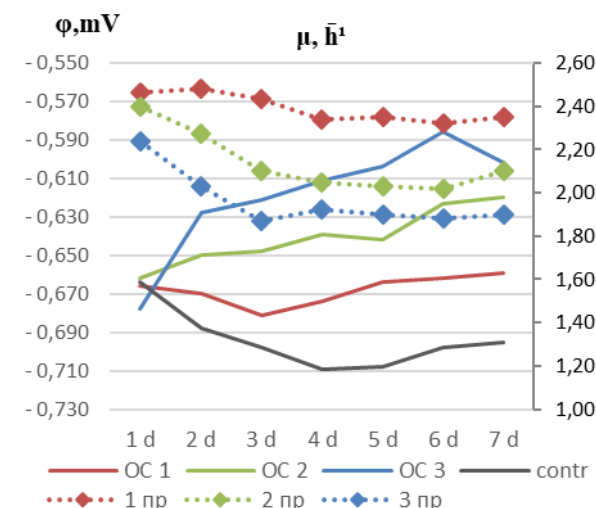


Рис. 3 Изменение численности бактерий и потенциала среды от времени коррозионных испытаний в системах с испытуемыми ОС

Взаимосвязь между метаболической активностью СРБ (SRB) и катодным потенциалом, а также его влиянием на низкоуглеродистую сталь марки Ст.3 оценивали методом импедансной спектроскопии. Плоские образцы стали с площадью рабочей

поверхности 1 см² использовали в качестве рабочих электродов для электрохимических испытаний. Одну из сторон каждого электрода изолировали оксидной смолой. Контактную поверхность полировали с использованием бумаги SiC с зернистостью от 600 до 2000, обезжиривали венской известью, этиловым спиртом и выдерживали под действием ультрафиолетового излучения не менее 30 мин.

Данные сопротивления переноса заряда показывают постепенный рост значений. Поверхность стального образца в контрольной ячейке, исходя из полученных результатов, наращивает на протяжении всего времени экспозиции сульфидную пленку, экранирующую поверхность металла. в ячейках с ингибиторами её образование не наблюдается.

По характеру катодных поляризационных кривых судили об интенсивности коррозионного процесса.

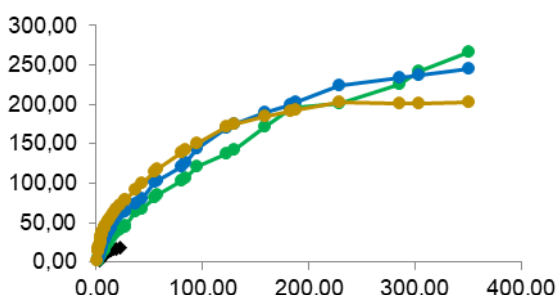


Рис. 4 Диаграммы Найквиста на 7 суток (черная – контроль, зеленая ОС2, синяя ОС3, коричневая ОС1)

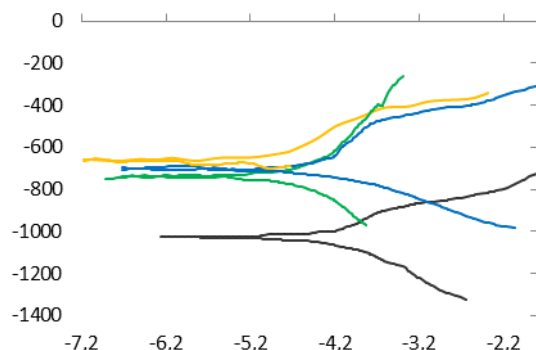


Рис. 5 Поляризационные кривые на 7 суток (черная – контроль, зеленая ОС2, синяя ОС3, коричневая ОС1)

После завершения электрохимических испытаний образцы были взяты для изучения состояния поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа (Hitachi TM 3000, с приставкой энергодисперсионного анализа OXFORD). Образцы третьей серии подвергали первоначальному микроскопическому исследованию без очистки поверхности от продуктов коррозии и жизнедеятельности с целью установления природы и компонентного состава поверхностных наслоений. Внешний вид образцов визуализировали после подготовки с использованием следующей процедуры: поверхности пластин подвергали грубой очистке, шлифовке и полировке с градиентным переходом, затем обезвоживали с использованием градиента этанола (при 50%, 75%, 95% и 100%) в течение 15 мин.

Анализ поверхности

По окончании коррозионных испытаний, отмечалось следующее: незначительное наличие тонкой сульфидной пленки на поверхностях стали; осадок преимущественно буро-коричневого цвета; умеренная степень помутнения среды; незначительный запах.

Структурные характеристики биопленки и неорганические отложения отличались от образовавшихся на образцах стали, экспонированной в среде без защиты. Кроме того, было отмечено, что в процессе коррозионных испытаний, на поверхности стальных образцов наблюдалось образование отложений черного цвета, содержащих сульфид железа и отложений коричневатого цвета, содержащих окись железа. Отложения носили локальный характер и содержали достаточное количество *Desulfovibrio desulfuricans*. Площадной анализ поверхностей образцов, экспонированных в среде с ОС1 показал наличие дислокаций питтинговых образований. На поверхностях образцов, экспонированных в среде с ОС2 наличия следов коррозии не наблюдали, однако образцы характеризовались обильными поверхностными отложениями. Поверхности образцов, экспонированных в среде с ОС3, так же характеризовались обильными поверхностными отложениями и отсутствием питтинговых образований (рисунки 6 – 8, таблицы 1 – 3):

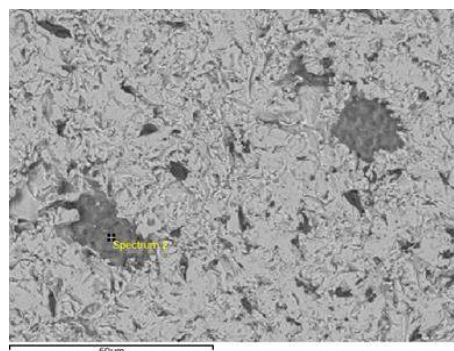


Рис. 6 Участок поверхности образца стали с питтинговыми образованиями, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 1)

Таблица 1

Участок поверхности образца стали с питтинговыми образованиями, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 1)

Element	Weight %	Weight %	Atomic %
Oxygen	17.632	0.380	42.399
Aluminum	0.382	0.098	0.544
Sulfur	0.526	0.102	0.632
Calcium	1.137	0.115	1.091
Iron	80.323	0.405	55.333

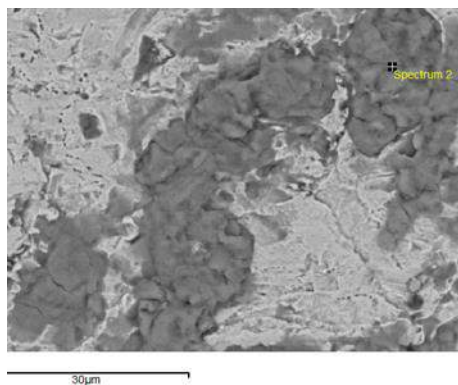


Рис. 7 Участок поверхности образца стали с наложением продуктов метаболизма бактериальных клеток, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 2)

Таблица 2

Участок поверхности образца стали с наложением продуктов метаболизма бактериальных клеток, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 2)

Element	Weight %	Weight %	Atomic %
Oxygen	7.271	0.327	21.582
Iron	90.515	0.461	76.966
Zinc	1.032	0.302	0.750
Bromine	1.182	0.194	0.702

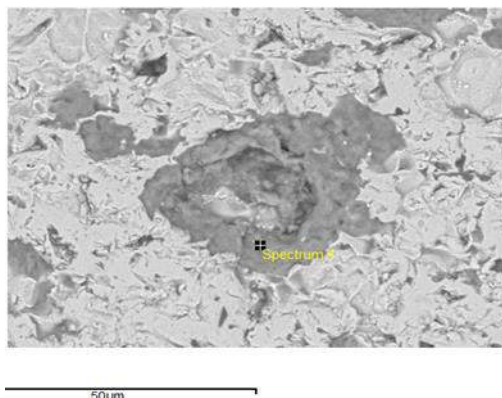


Рис. 8 Участок поверхности образца стали с наложением продуктов метаболизма бактериальных клеток, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 3)

Таблица 3

Участок поверхности образца стали с наложением продуктов метаболизма бактериальных клеток, точка соответствует компонентному составу, указанному в таблице (в среде с ОС 3)

Element	Weight %	Weight %	Atomic %
Carbon	2.928	0.888	10.751
Oxygen	5.985	0.362	16.496
Sulfur	0.669	0.111	0.920
Chlorine	0.950	0.121	1.181
Iron	89.469	0.904	70.652

Микроскопическим анализом шлифов торцевых срезов образцов, экспонированных в ОС1

обнаружено наличие очагов коррозии имеющий глубинный характер; шлифов торцевых срезов образцов, содержащихся в средах с ОС2 и ОС3 очагов зарождения питтинговой коррозии не установлено.

Скорость коррозии и защитный эффект

По окончании коррозионных испытаний образцы двух серий извлекали из коррозионной среды, очищали от продуктов коррозии и метаболизма и исследовали в дальнейшем гравиметрическим методом. Из показателей изменения массы образцов рассчитывали скорость коррозии и защитный эффект.

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad (2)$$

где K – скорость коррозии [g/m²h⁻¹]; Δm – разность масс образцов в g; S – средняя площадь поверхности образца в м²; t – время экспозиции, равное 168 часам.

$$Z = \frac{\Delta K}{K} \cdot 100\% \quad (3)$$

где Z – защитный эффект в %, ΔK – разность скорости коррозии в присутствии ингибитора и контрольного образца, K – скорость коррозии контрольного образца.

В присутствии испытуемых органических соединений в концентрации 3,0 ммоль/л⁻¹ скорость коррозии для образцов, экспонированных в средах с защитой достигается: 0,283 г/м²ч⁻¹ с ОС1, защитный эффект при этом составил 32%; в средах, содержащих ОС2 и ОС3 достигается скорость коррозии 0,267 г/м²ч⁻¹ и 0,045 г/м²ч⁻¹, защитный эффект равен 36 % и 89,1% соответственно для ОС2 и ОС3. в случае с ОС1 и ОС2 скорости коррозии и защитный эффект декларируются, как характеризующие недостаточную эффективность ингибитора в применяемой концентрации. в средах, содержащих ОС3 скорость коррозии значительно ниже, а величина защитного эффекта при этом декларируется как достаточно эффективная в минимальной испытуемой концентрации. Низкая скорость течения коррозионного процесса и очевидный защитный эффект дают основания для рассмотрения данного органического соединения для защиты низкоуглеродистой стали.

Заключение

1. Исследованные производные фенотиазина с точки силы их влияния на коррозионный процесс, с учетом полученных опытным путем скоростей и защитного эффекта можно расположить в ряду ОС3> ОС2> ОС1.
2. Исходя из структурных особенностей данных соединений, можно сделать вывод о том, что способность регулировать бактериальную и коррозионную активность зависит от места положения заместителей и их вида.
3. Проведенный гравиметрический, электрохимический и микроскопический методы анализа позволил установить наименьшую концентрацию производного фенотиазина (ОС3), при которой возможно использовать данное вещество для замедления течения

- коррозионного процесса в средах, бактериальных клеток и оказывать биоцидное инокулированных СРБ. действие на клетки СРБ.
4. Установлена способность органических соединений проникать через белковую оболочку

Литература

1. Розенфельд И.Л. Замедлители коррозии в нейтральных средах. М.: Изд-во АН СССР, 1953. - 247с.
2. Кузнецов Ю. И. Современное состояние теории ингибирования коррозии металлов // Защита металлов. 2002. - Т.38. - №2. - С.122-131
3. Плассеева Е.И., Трусов В.И. Защита от коррозии труднодоступных конструкций отсеков судов.....// Морские интеллектуальные технологии. 2019. - Т. 2. - № 3(45). - С. 107-110.....
4. Дубинская Е.В., Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е. Ингибиторная защита стали в сероводородных средах.// Вестник ТГУ. 2013. - Т.18. - Вып.5. - С.2814.
5. Химико-токсикологический анализ лекарственных средств из группы нейролептиков: учебное пособие / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, кафедра фармацевтической и токсикологической химии. – Иркутск : ИГМУ, 2016 – 31 с.
6. Хаджибаев А.М., Касымова К.Р., Садыков Р.Р. Фенотиазиновые красители – новые возможности в борьбе с хирургической инфекцией/ Shoshilinch tibbiyot axborotnomasi, 2013. - № 2. - С.43-48
7. ГОСТ 9.912-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии.
8. Zilberberg I.,Pelmenschikov A.,Mcgrath C.J.,Davis W., Leszczynska D., Leszczynski J. Reduction of Nitroaromatic Compounds on the surface of metallic iron: Quantum Chemical Study. Int. J. Mol. Sci. 2002, 3, 801-813 DOI:10.3390/i3070801
9. Кириллова О. В., Беляева А. С., Колчина Г. Ю. Анализ корреляции строения и свойств антигистаминных препаратов /Башкирский химический журнал, 2017. - Т.24. - №1. - С.73-81
10. Жерносок А.К. Внедрение концепции трансляционной медицины в образовательный процесс по специальности «Фармация»/ Вестник ВГМУ, 2014. - Т.13. - №1. - С.131-138
11. Авдеев Я.Г., Кузнецов Ю.И. Физико-химические аспекты ингибирования кислотной коррозии металлов ненасыщенными органическими соединениями/ Успехи химии, 2012. - 81 (12). - С.1133-1145
12. Подобаев А.Н. Влияние хлорид-ионов на скорость растворения железа в слабокислом сульфатном растворе / Защита металлов. - 2005. Т.41. - №6. - С.592-597
13. Важев В.В., Мунарбаева Б.Г., Важева Н.В., Губенко М.А. QSAR-моделирование ингибиторов роста *Pasteurella multocida* / Аграрный вестник Урала. 2019. - №9 (188) - С. 30-36
14. Алцыбеева А.И., Тронева Е.А., Бурлов В.В. Молекулярные аспекты защитного действия угдеводородорастворимых ингибиторов коррозии металлов/ Известия СПбГТИ(ТУ), 2014. - №26. - С.26-30

References

1. Rozenfel'd I.L. Zamedliteli korrozii v nejtral'ny`kh sredakh [Corrosion inhibitors in neutral environments]. M.: Izd-vo AN SSSR, 1953. - 247p.
2. Kuznecov Yu. I. The current state of the theory of metal corrosion inhibition // Zashhita metallov [Metal protection], 2002. - T.38. - №2. - P.122-131
3. Ekaterina I. Plaskееva, Valery I. Trusov Protection against corrosion of difficulty available designs of ship's compartments // Morskіe intellektual'nye tekhnologii, 2019 - T. 2. - №3 (45). – P. 107-110
4. Dubinskaya E.V., Vigdorovich V.I., Czy`gankova L.E. Ingibitornaya zashhita stali v serovodorodny`kh sredakh [Inhibitory protection of steel in hydrogen sulfide environments].// Vestnik TGU, 2013. -T.18. - vy`p.5.,P. 2814.
5. Khimiko-toksikologicheskij analiz lekarstvenny`kh sredstv iz gruppy` nejroleptikov [Chemical-toxicological analysis of drugs from the group of neuroleptics]: uchebnoe posobie / E.A. Illarionova, I.P. Sy`rovatskij; FGBOU VO IGMU Minzdrava Rossii, kafedra farmatsevticheskoy i toksikologicheskoy khimii. –Irkutsk : IGMU, 2016 – 31 p.
6. Khadzhibaev A.M., Kasy`mova K.R., Sady`kov R.R. Fenotiazinovy`e krasiteli – novy`e vozmozhnosti v bor`be s khirurgicheskoy infekciej [Phenothiazine dyes - new possibilities in the fight against surgical infection]/ Shoshilinch tibbiyot axborotnomasi, 2013, № 2, P.43-48
7. GOST 9.912-89 Edinaya sistema zashhity` ot korrozii i stareniya. Stali i splavy` korroziionnostojkie. Metody` uskorenny`kh ispy`tanij na stojkost` k pittingovoj korrozii. [Unified system of protection against corrosion and aging. Steels and alloys are corrosion resistant. Accelerated Pitting Test Methods]
8. Zilberberg I.,Pelmenschikov A.,Mcgrath C.J.,Davis W., Leszczynska D., Leszczynski J. Reduction of Nitroaromatic Compounds on the surface of metallic iron: Quantum Chemical Study. Int. J. Mol. Sci. 2002. 3, 801-813 DOI:10.3390/i3070801
9. Kirillova O. V., Belyaeva A. S., Kolchina G. Yu. Analiz korrelyaczii stroeniya i svojstv antigistaminny`kh preparatov [Analysis of the correlation of the structure and properties of antihistamines] /Bashkirkij khimicheskij zhurnal, 2017. t.#24. #1. S.73-81
10. Zhernosek A.K. Vnedrenie koncepczii translyaczionnoj mediciny` v obrazovatel`ny`j proczess po speczial`nosti «Farmaczija» [Implementation of the concept of translational medicine in the educational process in the specialty "Pharmacy"]/ Vestnik VGMU, 2014, t.13, #1. S.131-138
11. Avdeev Ya.G., Kuznecov Yu.I. Fiziko-khimicheskie aspekty` ingibirovaniya kislотноj korrozii metallov nenasy`shenny`mi organicheskimi soedineniyami [Physicochemical Aspects of Inhibition of Acid Corrosion of Metals by Unsaturated Organic Compounds]/ Uspekhi khimii 81 (12) S.1133-1145 (2012)

12. Podobaev A.N. Vliyanie khlorid-ionov na skorost' rastvoreniya zheleza v slabokislom sul'fatnom rastvore [Effect of chloride ions on the rate of dissolution of iron in a slightly acidic sulfate solution] / Zashhita metallov, 2005, t.41, #6, s.592-597
13. Vazhev V.V., Munarbaeva B.G., Vazheva N.V., Gubenko M.A. QSAR-modelirovanie ingibitorov rosta Pasteurella multocida [QSAR modeling of growth inhibitors Pasteurella multocida] / Agrarny'j vestnik Urala #9 (188), 2019, S30-36
14. Alczy'beeveva A.I., Tronova E.A., Burlov V.V. Molekulyarny'e aspekty' zashhitnogo dejstviya ugdevodorodorastvorimy'kh ingibitorov korrozii metallov [Molecular Aspects of the Protective Action of Hydrocarbon-Soluble Metal Corrosion Inhibitors] / Izvestiya SPbGTI(TU), 2014. - № 26. - P.26-30

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олеся Александровна Евтуховская, аспирант института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: olesya.evtuhovsk@mail.ru

Мария Алексеевна Агиевич, кандидат химических наук, доцент с учёной степенью кандидат наук института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Константин Александрович Агапов, ассистент кафедры химии факультета естественнонаучного и гуманитарного образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: perzovochka@mail.ru

Жданова Марина Андреевна, ассистент кафедры химии факультета естественнонаучного и гуманитарного образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: marina.zhdanova.1998@mail.ru

Анжела Алексеевна Грибанькова, доктор педагогических наук, кандидат химических наук, доцент, профессор кафедры химии факультета естественнонаучного и гуманитарного образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Gribankova@smtu.ru

Olesya A. Evtukhovskaya, Graduate Student of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: olesya.evtuhovsk@mail.ru

Maria A. Agievich, Ph. D. (Chem), Assistant Professor of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Konstantin A. Agapov, assistant of Department of Chemistry, Faculty of Science and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: perzovochka@mail.ru

Marina A. Zhdanova, assistant of Department of Chemistry, Faculty of Science and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: marina.zhdanova.1998@mail.ru

Anzhela A. Gribankova, Dr. Sci. (Edu), Ph. D. (Chem), Assistant Professor, Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Gribankova@smtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.05.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 28.05.2022.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 629.12.037

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.047>

Прогнозирование долговечности судовых дейдвудных подшипников

В.К. Румб¹ vkrumb@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Проблема повышения эксплуатационной долговечности судовых валопроводов во многом определяется безотказной работой дейдвудных подшипников. Среди них кормовые дейдвудные подшипники находятся особенно в тяжелых условиях, поскольку имеют кромочное нагружение, обусловленное изгибом вращающегося гребного вала под действием сил тяжести гребного винта и самого вала. Дополнительно эти подшипники подвергаются знакопеременным нагрузкам от механической и гидродинамической неуравновешенности гребного винта, расцентровки линии валопровода, деформации корпуса судна и т.д. Основным повреждающим фактором дейдвудных подшипников остается изнашивание.

Предлагается методика прогнозирования долговечности дейдвудных подшипников по критерию износа. В своей основе методика базируется на гидродинамическом расчете, теории случайных процессов и имитационном моделировании. Их сочетание позволяет учесть влияние большого количества факторов на процесс изнашивания, многие из которых являются неопределенными по своей природе. Из-за неодинакового влияния этих факторов сценарии изнашивания подшипников могут существенно отличаться друг от друга, что в конечном итоге приводит к разбросу долговечности даже однотипных подшипников. Именно с позиции того, что долговечность подшипника является случайной величиной, построена данная методика. Ее практическую апробацию иллюстрирует конкретный пример.

Актуальность определения долговечности обусловлена тенденцией проектирования конкурентоспособных изделий машиностроения. В условиях постоянно возрастающих требований к проектным решениям уже недостаточно ограничиваться расчетами прочности, нужно уметь оценивать долговечность. Все это вызывает необходимость пересмотра сложившихся взглядов на расчеты прочности, которые должны дополняться, а в будущем и заменяться расчетом долговечности.

Ключевые слова: валопровод, подшипник, изнашивание, масляный слой, гидродинамика, долговечность, вероятность, имитационное моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Румб В.К. Прогнозирование долговечности судовых дейдвудных подшипников. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 94—99.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.047>

Predicting the durability of marine deadwood bearings

Viktor K. Rumb¹ vkrumb@mail.ru

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

Abstract. The problem of increasing the operational durability of ship shaft lines is largely determined by the trouble-free operation of deadwood bearings. Among them, stern deadwood bearings are especially in difficult conditions, since they have an edge load due to the bending of the rotating propeller under the influence of the gravity of the propeller and the shaft itself. In addition, these bearings are subjected to alternating loads from mechanical and hydrodynamic imbalance of the propeller, uncentering of the shaft line, deformation of the hull of the vessel, etc. The main damaging factor of deadwood bearings remains wear.

A technique for predicting the durability of deadwood bearings by the criterion of their wear is proposed. The technique is based on hydrodynamic calculation, the theory of random processes and simulation modeling. Their combination allows you to take into account the influence of a large number of factors on the wear process, many of which are uncertain in nature. Due to the unequal influence of these factors, bearing wear scenarios can differ significantly from each other, which ultimately leads to a spread in the durability of even the same type of bearings. It is from the position that the durability of the bearing is a random variable, this technique is built. Its practical approbation is illustrated by a concrete example.

The relevance of determining durability is due to the tendency to design competitive engineering products. In the conditions of constantly increasing requirements for design solutions, it is no longer enough to limit yourself to strength calculations, you need to be able to assess durability. All this necessitates a revision of the prevailing views on strength calculations, which should be supplemented, and in the future replaced by the calculation of durability.

Keywords: shaft duct, bearing, wear, oil layer, hydrodynamics, durability, probability, simulation modeling, forecasting

For citation: Viktor K. Rumb, Forecasting the durability of marine deadwood bearings, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 94—99.

Введение

Проблема повышения эксплуатационной долговечности судовых валопроводов во многом определяется безотказной работой дейдвудных подшипников. Среди них кормовые дейдвудные подшипники работают особенно в тяжелых условиях поскольку имеют кромочное нагружение, обусловленное изгибом вращающегося гребного вала под действием сил тяжести гребного винта и самого вала. Дополнительно эти подшипники подвергаются знакопеременным нагрузкам от механической и гидродинамической неуравновешенности гребного винта, расцентровки линии валопровода, деформации корпуса судна и т.д. Основным повреждающим фактором дейдвудных подшипников остается изнашивание.

Изнашивание подшипников скольжения представляет собой довольно сложный процесс, зависящий от множества факторов [3]. В общем виде данный процесс может быть выражен зависимостью $I = f(t)$, где I – износ, t – наработка подшипника. Соответственно скорость изнашивания будет $a_{И} = dI/dt$. На кривых изменения $I = f(t)$ и $a_{И} = f(t)$ (рис.1) выделяют три характерных участка – три периода жизни подшипника. На первом участке t_1 , соответствующем периоду приработки в начале эксплуатации, наблюдается интенсивное изнашивание с постепенным уменьшением скорости $a_{И}$. На втором участке t_2 (период нормальной эксплуатации) скорость изнашивания практически не меняется, хотя в реальных условиях функция $a_{И} = f(t)$ имеет колебания относительно среднего значения. Переменная скорость изнашивания обусловлена условиями нагружения подшипника, качеством смазки и многими другими факторами. Третий участок t_3 (период интенсивного износа) характеризуется достижением предельного зазора, при котором дальнейшая эксплуатация подшипника становится нежелательной во избежание нарушения работоспособности дейдвудного устройства или вообще недопустимой из-за возможных аварийных ситуаций.

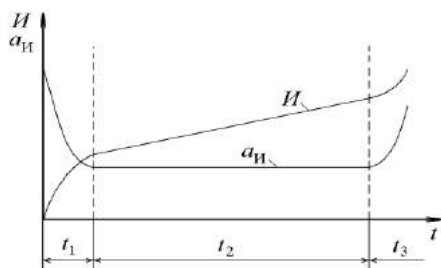


Рис. 1. Кривые износа и скорости изнашивания

Практический интерес представляет период нормальной эксплуатации, так как он является наиболее длительным. Именно для этого периода при проектировании подшипников рассчитывают количественные показатели долговечности. Установить точные временные границы этого

периода, как правило, крайне сложно по причине случайных изменений функциональных зависимостей $I = f(t)$ и $a_{И} = f(t)$. По этой причине для описания изнашивания используют аппарат теории случайных процессов. Согласно данной теории долговечность подшипника по износу до предельного зазора является дискретной, но случайной величиной, которая подчиняется определенному закону распределения. В этом случае наработка естественно будет выражаться математическим ожиданием (средней наработкой до предельного зазора) и средним квадратичным отклонением, характеризующим рассеивание наработки относительно средней величины.

Основные положения прогнозирования долговечности подшипников скольжения

Понятно, что долговечность подшипника скольжения зависит от износа сопряжения вал-втулка, причем увеличение зазора равно сумме износов поверхностей втулки подшипника $I_{В} = f(t)$ и шейки вала $I_{Ш} = f(t)$, т.е.

$$\Delta Z = I_{В}(t) + I_{Ш}(t).$$

С учетом приведенной зависимости величину предельно допустимого зазора можно выразить так

$$Z_{пр} = Z_{м} + \Delta Z_{пр},$$

где $Z_{м}$ – монтажный (установочный) зазор в подшипнике, $\Delta Z_{пр}$ – предельное увеличение зазора.

Тогда предельный износ подшипника

$$I_{пр} = Z_{пр} - Z_{м}.$$

Таким образом, в общей проблеме долговечности дейдвудного подшипника важное место отводится определению монтажного и предельно допустимого зазора [5].

Монтажные зазоры стремятся назначать минимальными, однако следует иметь в виду, что при чрезмерно малых зазорах увеличивается трудоемкость монтажных работ, при больших зазорах сокращается долговечность подшипника. Предельно допустимые зазоры обычно задают исходя из сохранения режима жидкостной смазки и допустимого износа.

Напомним, при наличии жидкостной смазки поверхности трения отделяются друг от друга слоем смазки и контакт между шейкой и втулкой отсутствует. Такое возможно только тогда, когда минимальная толщина слоя смазки превышает суммарную высоту микронеровностей поверхности шейки R_z^{III} и втулки R_z^B . Выполнение данного условия зависит также от прогиба опоры и перекоса вала. Влияние этих факторов на работоспособность подшипников исследовано недостаточно, поэтому рекомендуется принимать [4]

$$h_{min} = (1,3 \div 1,5) h_{кр},$$

где $h_{кр} = R_z^B + R_z^{III}$.

Задача по определению установочного и предельно допустимого зазоров в дейдвудном подшипнике пока не получила должного теоретического решения. В процессе

проектирования эти зазоры чаще всего назначают по нормативным данным и по аналогии с прототипом. Учитывая важность данного вопроса в общей проблеме долговечности подшипника, разными авторами предложены методы аналитического определения этих зазоров. Например, основываясь на гидродинамической теории смазки, в [1] приведена зависимость для диаметрального зазора, которую в международной системе единиц СИ можно записать так

$$\Delta = 3,643 \frac{\mu n d l}{h k \left(1 + \frac{l}{d}\right)}, \quad (1)$$

где Δ – диаметральный зазор в подшипнике, мм; μ – динамическая вязкость масла, Па с; n – частота вращения вала, мин⁻¹; d – диаметр шейки вала, м; h – толщина смазочного слоя, мкм; k – средняя удельная нагрузка в подшипнике, МПа; l – длина втулки, м.

Формулой (1) можно воспользоваться для расчета как монтажных, так и предельно допустимых зазоров. При заданном значении h вычисление Δ не представляет затруднений, так как остальные величины правой части (1) выражаются однозначно. Сложности возникают при определении толщины смазочного слоя, и они обусловлены тем, что величина μ , входящая в формулу, зависит не только от вида смазки, но и от температуры в рабочей зоне подшипника. При повышении температуры вязкость уменьшается. С достаточной для практических расчетов точностью зависимость динамической вязкости от температуры может быть представлена в виде

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^m,$$

где μ_0 – динамическая вязкость, соответствующая температуре T_0 ; m – показатель степени, для масел дейдвудных подшипников $m = 2,5 \div 3,5$.

Минимальную толщину масляного слоя подсчитывают на основе гидродинамической теории смазки [8]. Исходные положения этой теории базируются на том, что при вращении шейки смещается в сторону вращения и занимает эксцентричное положение относительно вкладышей. Соответственно минимальный зазор, эквивалентный толщине масляного слоя, будет

$$h_{\min} = 0,5\Delta(1 - \chi),$$

где χ – относительный эксцентриситет.

В общем случае относительный эксцентриситет определяется через безразмерный коэффициент нагруженности, численно равный параметру Зоммерфельда

$$So = \frac{k\psi^2}{\omega \mu},$$

где ψ – относительный зазор; ω – угловая скорость вращения шейки.

Приведенные выше рассуждения позволяют сделать вывод: толщина смазочного слоя и зазор в подшипнике – величины взаимосвязанные: по мере наработки толщина смазочного слоя уменьшается, а зазор увеличивается, рис. 2.

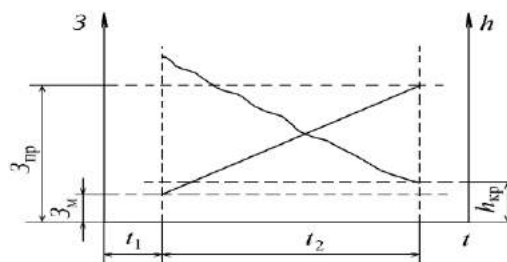


Рис. 2. Изменение зазора и толщины смазочного слоя

Вероятностный подход к прогнозированию долговечности подшипников скольжения

Считая решенным вопрос о зазорах, рассмотрим снова процесс изнашивания от установочного зазора до предельного состояния. Будем полагать, что по достижении износа, равного предельно допустимому зазору, ресурс подшипника исчерпывается. В пределах данных зазоров зависимость износа подшипника как случайной функции можно представить так

$$I(t) = a_{II} t^\beta + b_{II}.$$

В данном уравнении динамики износа средняя скорость изнашивания a_{II} является случайной величиной. При коэффициенте вариации ее величины в пределах до 0,4 можно с достаточной точностью принимать, что она подчиняется нормальному закону распределения. При коэффициенте вариации больше 0,4 a_{II} подчиняется распределению Вейбулла. Показатель степени β также является случайной величиной, которую можно задавать в функции от отношения h/h_{\min} по формуле

$$\beta = 1 + \left(\frac{h_{\min}}{h}\right)^m,$$

где h – расчетная толщина масляного слоя, m – показатель степени, $m = 2,5 - 3,5$.

Величина b_{II} характеризует износ по окончании приработки. Опытные данные свидетельствуют, что в большинстве случаев износ b_{II} относительно небольшой. Это позволяет при расчете долговечности подшипника пренебречь износом в период приработки. С учетом сказанного уравнение динамики износа принимает более простой вид

$$I(t) = a_{II} t^\beta.$$

В соответствии с данной формулой зависимость для определения долговечности до предельного состояния подшипника запишется следующим образом

$$T = \left(\frac{I_{np}}{a_{II}}\right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (2)$$

Несмотря на довольно простой вид этой формулы, вычисление ресурса подшипника оказывается далеко не тривиальной задачей. Сложность прогнозирования заключается в получении вероятностных характеристик долговечности T , которые зависят от выбранного закона распределения и коэффициентов вариации по сути всех входящих в формулу случайных величин

a_{II} , β и I_{np} . Само по себе определение данных параметров отличается большой трудоемкостью, которая состоит из сбора материалов по износам подшипников и их статистической обработки. Обойти эти трудности позволяет имитационное моделирование [9]. При этом вычисления сводятся к многократным расчетам искомой долговечности по (2). Для каждого такого расчета численные значения a_{II} , β и I_{np} задаются случайным образом в пределах их возможного изменения и заданных законов распределения. Полученное в результате таких расчетов множество дискретных значений T подвергают статистической обработке с целью определения математического ожидания, дисперсии, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации и построения гистограммы распределения, которая является аналогом функции плотности вероятностного закона.

Приближенно математическое ожидание m_T и среднее квадратичное отклонение S_T ресурса подшипника, считая, что долговечность зависит только от одной случайной величины – скорости изнашивания, могут быть подсчитаны в результате разложения функции (2) в ряд Тейлора и применения теоремы о числовых характеристиках случайных величин. Ограничиваясь в разложении двумя первыми членами ряда, выражения для указанных характеристик после преобразований принимают вид [2]

$$m_T \approx \left(\frac{I_{np}}{m_{a_{II}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left[1 + \frac{(1 + \beta) D_{a_{II}}}{2 \beta^2 m_{a_{II}}^2} \right],$$

$$S_T \approx \sqrt{\frac{\frac{2}{I_{np}^{\beta}} D_{a_{II}}}{\beta^2 m_{a_{II}}^{\frac{2}{\beta} + 2}} \left[1 + \frac{(1 + \beta)^2 D_{a_{II}}}{2 \beta^2 m_{a_{II}}^2} \right]},$$

где $m_{a_{II}}$ и $D_{a_{II}}$ – среднее значение и дисперсия коэффициента a_{II} , имеют размерности мкм/ч и (мкм/ч)² соответственно.

Если далее считать, что скорость изнашивания подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием $m_{a_{II}}$ и дисперсией $D_{a_{II}}$, то плотность долговечности будет выражаться уравнением

$$f_T(t) = \frac{I_{np} \beta}{R^{\beta+1} \sqrt{2 \pi D_{a_{II}}}} \exp \left[- \frac{\left(\frac{I_{np}}{T^{\beta}} - m_{a_{II}} \right)^2}{2 D_{a_{II}}} \right]. \quad (3)$$

Выражение (3) всего лишь устанавливает характер распределения долговечности подшипника до предельного состояния. Что касается вероятности безотказной работы или вероятности того, что за время t износ подшипника не достигнет предельно допустимого зазора, то она определяется по известной из теории надежности зависимости, которую применительно к решаемой задаче можно представить в виде табулированной функции нормального распределения

$$Q(t) = \Phi \left(\frac{\frac{I_{np}}{T^{\beta}} - m_{a_{II}}}{\sqrt{D_{a_{II}}}} \right). \quad (4)$$

Вероятностной зависимостью (4) можно пользоваться, непосредственно определяя вероятность безотказной работы подшипника для интересующей наработки. Решение этой так называемой прямой задачи при данных условиях не представляет особых затруднений. По-другому обстоит дело, когда надо решать обратную задачу, а именно для заданной вероятности подсчитать долговечность. Такой подсчет проще осуществить методом последовательных приближений.

Практическая оценка долговечности дейдвудного подшипника

Изложенное выше представляет собой не что иное, как словесную методику прогнозирования долговечности подшипников судового валопровода. Ее практическое применение покажем на примере расчета кормового дейдвудного подшипника обычной конструкции, характерной для металлических подшипников [6]. Подшипник состоит из бронзовой втулки, залитой центробежным способом баббитом Б 83 твердостью HB = 18. Для прочности соединения с баббитом внутри втулки сделаны винтовые канавки глубиной 3 мм и шагом 30 мм. Установочный (монтажный) диаметральный зазор в подшипнике 0,8÷1,0 мм. Смазка подшипника осуществляется маслом Castrol 215 MXD вязкостью 113 сСт при температуре 40°C. Масло к подшипнику подводится самотеком из бака, расположенного выше ватерлинии.

Диаметр шейки гребного вала в месте подшипника 599 мм. Поверхность шейки обрабатывается с шероховатостью $R_z = 10$ мкм. Длина бронзовой втулки 1700 мм. Расчетное давление в подшипнике 0,32 МПа.

Для оценки долговечности дейдвудного подшипника, прежде всего, определим толщину масляного слоя, пользуясь (1)

$$h = 3,643 \frac{\mu n d l}{\Delta k \left(1 + \frac{l}{d} \right)} = 3,643 \frac{0,103 \cdot 127 \cdot 0,599 \cdot 1,7}{0,9 \cdot 0,32 \left(1 + \frac{1,7}{0,599} \right)} = 43,9 \text{ мкм.}$$

В данной формуле: Δ – диаметральный зазор в подшипнике, $\Delta = 0,9$ мм; n – частота вращения вала, $n = 127$ мин⁻¹; d – диаметр шейки вала, $d = 0,599$ м; k – давление в подшипнике, $k = 0,32$ МПа; l – длина втулки, $l = 1,7$ м; μ – динамическая вязкость масла,

$$\mu = \nu \rho = 113 \cdot 10^{-6} \cdot 910 = 0,103 \text{ Па}\cdot\text{с,}$$

где ν – кинематическая вязкость масла, $\nu = 113 \cdot 10^{-6}$ м²/с; ρ – плотность масла, $\rho = 910$ кг/м³.

Предельный зазор задаем из условия сохранения жидкостной смазки. Это условие выполняется при минимальной толщине масляного слоя

$$h_{\min} = (1,2 \div 1,5) h_{kp} = 1,3 \cdot 10 = 13 \text{ мкм,}$$

где $h_{kp} = R_z = 10$ мкм.

Величине h_{\min} соответствует предельный зазор

$$h_{np} = 3,643 \frac{\mu n d l}{h_{\min} k \left(1 + \frac{l}{d}\right)} = 3,643 \frac{0,103 \cdot 127 \cdot 0,599 \cdot 1,7}{13 \cdot 0,32 \left(1 + \frac{1,7}{0,599}\right)} = 3,04 \text{ мм.}$$

Таким образом, предельно допустимый износ подшипника по условиям сохранения жидкостной смазки определяется разностью

$$I_{np} = \Delta_{np} - \Delta = 3,04 - 0,9 = 2,14 \text{ мм} = 2140 \text{ мкм.}$$

Принимая дополнительно среднюю скорость изнашивания $m_{aII} = 0,03$ мкм/ч и дисперсию этой скорости $D_{aII} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ (мкм/ч)², математическое ожидание m_T и среднее квадратичное отклонение S_T ресурса рассматриваемого подшипника могут быть подсчитаны соответственно по приведенным выше формулам

$$m_T \approx \left(\frac{I_{np}}{m_{aII}}\right)^{\frac{1}{\beta}} \left[1 + \frac{(1+\beta) D_{aII}}{2 \beta^2 m_{aII}^2}\right] =$$

$$= \left(\frac{2140}{0,03}\right)^{1/1,026} \left[1 + \frac{(1+0,026) 2,5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1,026^2 \cdot 0,03^2}\right] = 55177 \text{ ч;}$$

$$S_T \approx \sqrt{\frac{\frac{2}{I_{np}^{\frac{2}{\beta}} D_{aII}}}{\beta^2 m_{aII}^{\frac{2}{\beta} + 2}} \left[1 + \frac{(1+\beta)^2 D_{aII}}{2 \beta^2 m_{aII}^2}\right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{2140^{\frac{2}{1,026}} \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{1,026^2 \cdot 0,03^{\left(\frac{2}{1,026} + 2\right)}} \left[1 + \frac{(1+0,026)^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1,026^2 \cdot 0,03^2}\right]} = 8963 \text{ ч.}$$

В этих формулах показатель степени, характеризующий динамику изнашивания, определяется из соотношения

$$\beta = 1 + (h_{\min}/h)^3 = 1 + (13/43,9)^3 = 1,026 .$$

Приведенные расчеты показали: долговечность рассмотренного дейдвудного подшипника 55177 ± 8963 ч. Если исходить из среднегодовой эксплуатации судна в пределах 5000 ч, то данный подшипник будет находиться в работоспособном состоянии 9 лет.

Перспективы

Понятно, что приведенный пример является иллюстрацией предлагаемой методики. Естественно, для получения более надежных результатов необходимо иметь статистические данные по изнашиванию дейдвудных подшипников. В настоящее время таких данных очень мало, имеются лишь отдельные результаты лабораторных испытаний. Между тем, выходом из этой неопределенной ситуации является имитационное моделирование. По своим возможностям оно напоминает статистический натурный эксперимент и следовательно позволяет проигрывать на ЭВМ различные сценарии износа. Основные положения имитационного моделирования отмечены выше.

В заключение еще раз отметим: в условиях постоянно возрастающих требований к проектным решениям уже недостаточно ограничиваться только расчетом прочности судовых валопроводов. Нужно дополнительно оценивать долговечность непосредственно, выражая ее в часах работы до предельного состояния. Такая оценка расчетным путем позволяет предупреждать отказы и аварийные ситуации.

Литература

1. Виноградов С.С., Гавриш П.И. Износ и надежность винторулевого комплекса судов. – М.: Транспорт, 1970, 232 с.
2. Волков Д.П., Николаев С.Н. Надежность строительных машин и оборудования. – М.: Высшая школа, 1979, 400 с.
3. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения. – М.: Машиностроение, 1980, 224 с.
4. Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А. Подшипники коленчатых валов тепловозных двигателей. – М.: Транспорт, 1981, 181 с.
5. Каратышкин С.Г. Динамически нагруженные подшипники судовых двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1968, 136 с.
6. Комаров В.В., Курылев А.С. Валопроводы рыбопромысловых судов. Ч.2. – Астрахань: изд-во АГТУ, 1997, 176 с.
7. Рубин М.Б., Бахарева В.Е. Подшипники в судовой технике: справочник. – Л.: Судостроение, 1987, 344 с.
8. Румб В.К. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов: учебник. – СПб.: СПбГМТУ, 2008, 298 с.
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978, 418 с.

References

1. Vinogradov S.S., Gavrish P.I. Wear and reliability of the propeller-oriented complex of ships. – M.: Transport, 1970, 232 s.
2. Volkov D.P., Nikolaev S.N. Reliability of construction machines and equipment. – M.: Vysshaya shkola, 1979, 400 s.
3. Voskresensky V.A., Dyakov V.I. Calculation and design of sliding supports. – M.: Mashinostroenie, 1980, 224 s.
4. Zakharov S.M., Nikitin A.P., Zagoryansky Yu.A. Crankshaft bearings of diesel locomotive engines. – M.: Transport, 1981, 181 s.
5. Karatyshkin S.G. Dynamically loaded bearings of marine internal combustion engines. – L.: Sudostroenie, 1968, 136 s.
6. Komarov V.V., Kurylev A.S. Shaft pipelines of fishing vessels. Ch.2. – Astrakhan': izd-vo AGTU, 1997, 176 s.
7. Rubin M.B., Bakhareva V.E. Bearings in ship technology: a reference book. – L.: Sudostroenie, 1987. – 344 p.

8. Rumb V.K. Durability of ship equipment. Construction and calculations of the strength of ship shaft pipelines: textbook.– SPb.: SPbSMTU, 2008, 298 s.
9. Shannon R. Simulation modeling of systems – art and science. – М.: Mir, 1978, 418 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Карлович Румб, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vkrumb@mail.ru

Victor K. Rumb, Ph.D.(Eng.), Professor, Professor of The Department of ship's internal combustion and diesel engines, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: vkrumb@mail.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 21.12.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.01.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 03.04.2022.

Научная статья

УДК 62 – 752.2

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.048>

Экспериментальное определение частоты свободных колебаний полиуретановых виброизоляторов, применяемых в судостроении

Ю.Ф. Титова¹ titova-stud@yandex.ru, С.Н. Яковлев² stannik59@mail.ru,

Л.В. Подколызина² lpodkolzina17@gmail.com, Н.В. Бабанин¹ nikolai-babanin@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. В работе приведено обоснование целесообразности замены резины на полиуретановые эластомеры при изготовлении виброизоляторов. Показано, что современные полиуретановые эластомеры имеют ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционным эластомером – резиной.

В статье представлено решение дифференциального уравнения движения колебательной системы для двух случаев: первый – когда силы сопротивления отсутствуют и второй – когда свободные колебания происходят с затуханием под действием внутреннего трения в эластомерном материале. Указано, что с точки зрения лучшего гашения свободных колебаний, увеличение гистерезисных потерь в виброизоляционном материале играет положительную роль.

В работе приведено подробное описание специального стенда для измерения упруго-диссипативных свойств виброизоляторов по трем направлениям. Стенд позволяет определить основные регламентируемые ГОСТ 27242-87 характеристики: статическую жесткость, демпфирование и минимальную внутреннюю собственную частоту.

Проведенные экспериментальные исследования показали перспективность применения нового для отечественного машиностроения эластомерного материала.

Ключевые слова: частота свободных колебаний, полиуретановый виброизолятор, логарифмический декремент затухания, гистерезис, коэффициент демпфирования.

Для цитирования: Титова Ю.Ф., Яковлев С.Н., Подколызина Л.В., Бабанин Н.В. Экспериментальное определение частоты свободных колебаний полиуретановых виброизоляторов, применяемых в судостроении, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 100—105.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.048>

Experimental determination of the frequency of free vibrations of polyurethane vibration isolators used in shipbuilding

Yuliyana F. Titova¹ titova-stud@yandex.ru, Stanislav N. Yakovlev² stannik59@mail.ru,

Lyudmila V. Podkolzina² lpodkolzina17@gmail.com, Nikolaj V. Babanin¹ nikolai-babanin@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

Annotation. The paper provides a rationale for the expediency of replacing rubber with polyurethane elastomers in the manufacture of vibration insulators. It is shown that modern polyurethane elastomers have a number of indisputable advantages over the traditional elastomer - rubber.

The article presents a solution to the differential equation of motion of an oscillatory system for two cases: the first - when there are no resistance forces and the second - when free vibrations occur with damping under the action of internal friction in an elastomeric material. It is indicated that from the point of view of better damping of free vibrations, an increase in hysteresis losses in a vibration-insulating material plays a positive role.

The paper provides a detailed description of a special stand for measuring the elastic-dissipative properties of vibration isolators in three directions. The stand allows you to determine the main characteristics regulated by GOST 27242-87: static stiffness, damping and the minimum internal natural frequency.

Experimental studies have shown the promise of using a new elastomeric material for domestic mechanical engineering.

Key words: free vibration frequency, polyurethane vibration isolator, logarithmic damping decrement, hysteresis, damping coefficient.

For citation: Yuliyana F. Titova, Stanislav N. Yakovlev, Lyudmila V. Podkolzina, Nikolaj V. Babanin, Experimental determination of the frequency of free vibrations of polyurethane vibration isolators used in shipbuilding, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 100—105.

Введение

В современном судостроении для защиты оборудования от вибраций его чаще всего устанавливают на резино-металлических

виброизоляторах. Благодаря специфическим свойствам резины, защита оборудования от вибраций решается довольно просто и не требует применения сложных устройств.

Гашение механических колебаний основано на превращении кинетической энергии амортизируемого объекта в тепловую за счет внутреннего трения в эластомерном материале виброизолятора. Среди множества параметров, определяющих виброизоляционные свойства конструктивных эластомеров, применяемых для изготовления виброизоляторов, для нас особенно важными является коэффициент поглощения энергии для оценки величины внутреннего трения эластомера.

Целью данной работы является экспериментальное исследование виброизоляционных свойств новых для отечественной промышленности эластомерных материалов, используемых для изготовления виброизоляторов, предназначенных для гашения свободных колебаний.

1. Материалы и методика исследования

В последние десятилетия в передовых промышленно-развитых странах во многих технических приложениях резину стали заменять на полиуретановые эластомеры, которые имеют конструктивные, технологические и что особенно важно эксплуатационные преимущества. Полиуретановые эластомеры имеют большой диапазон твердости и эластичности, высокую прочность и рабочий температурный интервал от -35°C до 75°C [1-5].

Для экспериментального исследования нами был выбран полиуретановый эластомер торговой марки Vibrotan фирмы Synair (Великобритания) твердостью 50 ShA. Данный материал относится к термореактивным литьевым полиуретанам, перерабатываемым литьем в открытую форму. Он имеет широкий диапазон по твердости (40...55 ShA) и большое внутреннее трение (порядка 8...35 %), что позволяет использовать его для рассеяния больших количеств энергии при ударном воздействии.

Всякая колеблющаяся система, закрепленная на упругом основании (виброизоляторе) при приложении к ней мгновенного силового импульса (удар) совершает свободные колебания (или собственные колебания) с определенной частотой. Частота этих колебаний называется собственной, так как параметры колебания определяются собственными характеристиками колебательной системы, в первую очередь жесткостью и величиной гистерезисных потерь в виброизоляционном материале.

Если сила сопротивления отсутствует, то система будет колебаться неопределенно долго. В отличие от идеальной пружины без затухания, в эластомерно-металлическом виброизоляторе вследствие внутреннего трения в виброизоляционном массиве (гистерезис) часть энергии деформации превращается в тепло. При этом амплитуда колебаний с течением времени уменьшается до полного прекращения (затухающие колебания). Таким образом, в реальных условиях всякое свободное колебание системы является затухающим, так как подвержено действию рассеивающих сил.

В общем случае тело, установленное на упругом основании (виброизоляторе) в декартовой системе координат имеет 6 степеней свободы: перемещение

вдоль осей координат X, Y, Z и вращение вокруг этих осей. Общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих колебание механической системы с 6 степенями свободы чрезвычайно сложно и может быть доведено до конца только для частных случаев. Поэтому чаще всего согласно [6] рассматривают каждую степень свободы в отдельности и независимо от других.

Рассмотрим случай затухающего колебания в эластомерно-металлическом виброизоляторе, схема которого представлена на рис. 1.

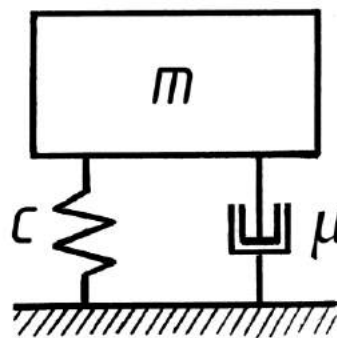


Рис. 1. Схема колебательной системы виброизолятора с затуханием

При составлении дифференциального уравнения движения колебательной системы примем допущение, что сила внутреннего трения приблизительно пропорциональна скорости движения. Согласно [7], дифференциальное уравнение движения такой системы имеет следующий вид:

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + cx = 0 \quad (1)$$

где m – масса амортизируемого объекта, кг;

\ddot{x} – ускорение движения колебательной системы,

$c = \frac{F}{x_{ст}}$ – статическая жесткость виброизолятора,

$\frac{\text{H}}{\text{мм}}$;

F – вес амортизируемого объекта, Н;

x – перемещение колебательной системы, мм;

η – коэффициент трения виброизоляционного

массива амортизатора, $\frac{\text{H} \cdot \text{с}}{\text{м}}$;

\dot{x} – скорость перемещения колебательной системы, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

Решение дифференциального уравнения (1) имеет следующий вид:

$$x = \lambda e^{-\mu t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

где λ – амплитуда свободных колебаний с затуханием, мм;

$\mu = \frac{\eta g}{2F} = \frac{\eta}{2m}$ – коэффициент, учитывающий

вязкое трение материала виброизолятора, $\frac{1}{\text{с}}$;

t – время, с;

α – начальный угол колебаний, рад;

ω_1 – круговая частота свободных колебаний с затуханием, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

ω – круговая частота свободных колебаний без затухания, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

При $\mu = 0$, т.е. отсутствии сил сопротивления (внутренне трение в материале виброизоляционного массива амортизатора) мы получим уравнение свободных колебаний без затухания с амплитудой λ и частотой ω :

$$x = \lambda \cos(\omega t + \alpha)$$

При этом движение будет периодическим с величиной периода $T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{const}$ и собственная

частота колебаний согласно [8] $f_0 = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$. Так как

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{x_{\text{ст}}}}, \text{ то:}$$

$$f_0 \approx \frac{0,5}{\sqrt{x_{\text{ст}}}}, \quad (3)$$

где f_0 – собственная частота колебаний системы без затухания, Гц;

x – осадка амортизатора под действием веса амортизируемого объекта, м.

Таким образом, собственная частота колебательной системы без затухания зависит только от осадки виброизолятора под действием веса F амортизируемого объекта.

На рис. 2 приведена зависимость частоты f_0 собственных колебаний системы от осадки виброизолятора. В качестве примера нами взят виброизолятор широко распространенный в судостроении БРМ102 (блок резино-металлический), который относится к типу КАС (корабельный амортизатор сварной) со следующими геометрическими размерами виброизоляционного массива: ширина $a = 50$ мм, длина $b = 80$ мм и высота $h = 40$ мм.

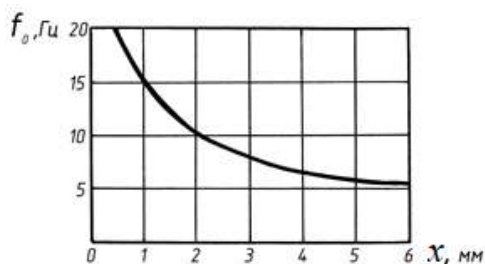


Рис. 2. Зависимость частоты собственных колебаний системы без затухания от деформации виброизолятора

В том случае, когда свободные колебания проходят с затуханием и $\mu \neq 0$, частота собственных колебаний системы будет равна:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \mu^2} \quad (4)$$

Таким образом, частота свободных колебаний системы с затуханием несколько ниже частоты собственных колебаний без затухания.

Из уравнения (2) для колебаний с затуханием

$$\lambda_1 = \lambda e^{-\mu t}, \text{ тогда отношение } \frac{\lambda_1}{\lambda} = e^{-\mu t}.$$

Логарифмический декремент затухания колебаний определяется как натуральный логарифм отношения двух последовательных максимальных или минимальных амплитуд затухающих свободных колебаний:

$$\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda}\right) = \mu T = \varepsilon$$

Из приведенного выше выражения следует, что

$$\mu = \frac{\varepsilon}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \varepsilon.$$

Подставив найденное выражение для μ в уравнение (4), получим:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \omega^2 \left(\frac{\varepsilon}{2\pi}\right)^2} = \omega \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{2\pi}\right)^2}. \quad (5)$$

Для конструкционных виброизоляционных эластомерных материалов декремент затухания ε находится в диапазоне от 0,3 до 0,7. Его точное определение возможно экспериментальным путем с использованием специального стенда [9].

Стенд позволяет определять основные характеристики виброизоляторов, регламентируемые ГОСТ 27242-87: статическую жесткость, демпфирование и минимальную внутреннюю собственную частоту.

Для оценки динамических характеристик испытуемых амортизаторов в вертикальном направлении стенд оборудован механизмом ударного нагружения и регистрирующей аппаратурой. Испытуемый амортизатор устанавливается между подвижной и неподвижной плитами. При испытаниях шток механизма ударного нагружения свободно перемещается в вертикальном направлении и приводится в движение спусковым устройством.

Груз (имитирующий силовой импульс или удар) после падения на подвижную плиту, сжимает виброизолятор. После этого, подвижная плита совершает затухающие колебания, которые регистрирует установленный на ней датчик.

Собственная частота свободных колебаний эластомерного виброизолятора зависит от осадки виброизолятора под рабочей нагрузкой. Так как жесткость виброизолятора в динамическом режиме больше жесткости при статическом нагружении, то можно сделать очень важный практический вывод, что при определении частоты собственных колебаний виброизолятора, в уравнении (3) необходимо учитывать не статическую, а динамическую осадку виброизолятора, которая как известно, более резко зависит от свойств эластомерного материала виброизолятора.

Анализируя уравнение (5) можно отметить, что если амортизируемый объект начал совершать колебание, то его колебание затухает тем быстрее, чем больше логарифмический декремент затухания ε . Очевидно, что с точки зрения лучшего гашения свободных колебаний, увеличение декремента затухания ε или гистерезисных потерь в эластомерном материале виброизолятора, играет положительную роль.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что свободное колебание эластомерного виброизолятора определяется его жесткостью и гистерезисными потерями. Если материал виброизолятора подвергнуть сначала сжатию, а затем восстановлению, то согласно [10], значение силы при нагружении будет больше, чем при восстановлении. Поэтому, кривая зависимости «напряжение-деформация» имеет вид петли.

Зависимость «напряжение-деформация» для эластомерных материалов при гармоническом нагружении представлена на рис. 3.

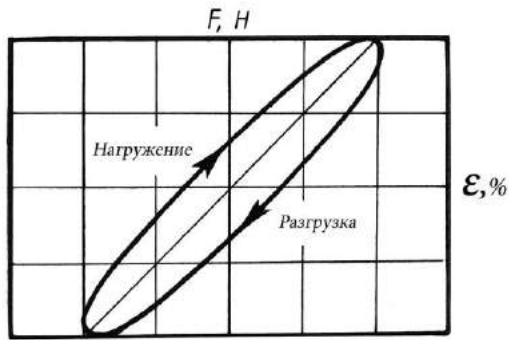


Рис. 3 График зависимости «напряжение-деформация» для эластомерных материалов при гармоническом нагружении

Приведенная особенность деформации эластомерных материалов связана с резко выраженными релаксационными свойствами. Потери на внутренне трение (гистерезис) при деформации эластомеров определяют в виброизоляторах логарифмический декремент затухания.

2. Результаты исследования

Экспериментальные исследования по определению демпфирования и собственной частоты виброизолятора с использованием специального стенда несколько отличаются от рекомендованных ГОСТ 27242-87. Так, в частности для определения демпфирования предлагается согласно [11] коэффициент демпфирования:

$$K = 2\mu\sqrt{cm}$$

где μ – коэффициент затухания, учитывающий вязкое трение материала виброизолятора;

$$c – \text{жесткость амортизатора } c = \frac{F}{x_{ст}}, \frac{Н}{мм};$$

m – масса амортизируемого объекта, кг.

При этом коэффициент затухания в классическом понимании определим по формуле:

$$\mu = \frac{\varepsilon}{T}$$

где T – период затухающих колебаний, с;

ε – логарифмический декремент затухания колебаний.

Таким образом, коэффициенты K и μ рассчитаем по значениям ε и T , которые определим методом акселерометрии при динамическом ударном нагружении виброизолятора с использованием программного комплекса Signal+ и Power Graph.

Осциллограмма затухающих колебаний опытного виброизолятора, где в качестве регистрируемого кинематического параметра выступает виброскорость, представлена на рис. 4.

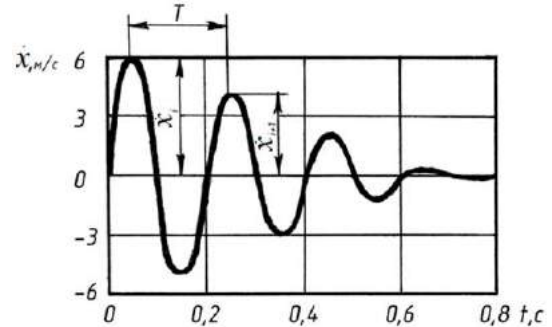


Рис. 4 Осциллограмма затухающих колебаний опытного виброизолятора (прорисовка)

Необходимо отметить, что на рисунке 4 приведена несколько идеализированная осциллограмма затухающих колебаний для большей наглядности. В реальных осциллограммах скорость начинает возрастать по синусоиде примерно через 0,04 с после удара, что объясняется реологическими свойствами виброизоляционного материала.

Логарифмический декремент затухания определим графически из осциллограммы колебаний:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{\dot{x}_i}{\dot{x}_{i+1}} \right)$$

где \dot{x}_i и \dot{x}_{i+1} – две последующие амплитуды в начале и конце i -го периода колебаний.

Минимальную внутреннюю собственную частоту опытного виброизолятора определим из осциллограммы по известному значению периода T затухающих колебаний по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{T},$$

где T – период колебаний, с.

После проведения графоаналитической обработки осциллограммы затухающих колебаний опытного виброизолятора, можно утверждать, что минимальная внутренняя собственная частота согласно ГОСТ 27242-87, составляет примерно 5 Гц.

Выводы

1. Собственная частота свободных колебаний эластомерного виброизолятора с затуханием примерно на 20...25 % меньше нежели частота свободных колебаний без затухания.

2. Свободное затухание эластомерного виброизолятора зависит от величины гистерезисных потерь в виброизоляционном материале, чем больше ε – логарифмический декремент затухания, тем быстрее колебания затухают.

3. Вторым физическим параметром, определяющим коэффициент демпфирования K является жесткость c , очевидно, что с ростом жесткости растет коэффициент демпфирования (поглощения) кинетической энергии амортизируемого тела.

Литература

1. Solota, S. Härteprüfung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren / Solota S. // Gummi. Fasern. Kunststoffe – 2016. – № 7. – pp. 26-31.
2. Bakhtiyarov S.I. Rheological studies of functional polyurethane composite: Part 2. Rheology of polyurethane composite, its compounds with and without solid additives (aluminum flakes) / S.I. Bakhtiyarov, J.S. Oxley // Journal of Elastomers and Plastics. - 2018. – Vol 50. – Is 3. – pp. 222-240.
3. Yakovlev S.N. Vibroisolating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction / S.N. Yakovlev, V.L. Mazurin // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 6(74). – pp. 53-60.
4. Oxley J.C. Rheological studies of functional polyurethane composite with solid additives: Part 2. Rheology of polyurethane composite with solid additives (calcium iodate particles and aluminum flakes) / J.S. Oxley, J. L. Smith // Journal of Elastomers and Plastics. - 2017. – Vol 50. – Is 4. – pp. 312-324.
5. Yakovlev S.N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes // Russian Engineering Research. – 2016. – No 4. – pp. 255-257.
6. Ивович, В.А. Защита от вибрации в машиностроении / В.А. Ивович, В.Я. Онищенко – М.: Машиностроение, – 1990. – 272 с.
7. Лепетов, В.А. Расчет и конструирование резиновых изделий / В.А. Лепетов, Л.Н. Юрцев. – Л.: Химия, 1987. – 405 с.
8. Yulianna F. Titova. Calculation of the frequency of own oscillations of polyurethane chock absorbers used in shipbuilding. Yulianna F. Titova., Stanislav N. Yakovlev. // Marine intellectual technologies. 2020. No 4. pp. 152-157.
9. Сиротин, П.В. Стенд для исследования статических и динамических характеристик виброизоляторов / П.В. Сиротин, И.Ю. Лебединский, М.М. Жилейкин, М.И. Сысоев // Вестник машиностроения. – 2020. – №4. – С. 36-40.
10. Neise E., Zepp C. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse / Neise E., Zepp C. // Gummi. Fasern. Kunststoffe – 2013. – № 1. – pp. 23-30.
11. Фролов, К.В. Прикладная теория виброзащитных систем. / К.В. Фролов, Ф.А. Фурман – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.

References

1. Zolota S. Härteprüfung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren. *GAK. Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2016; 7: 414-417.
2. Bakhtiyarov S.I., Oxley J.S., Smith J.L., Baldovi P.M. Rheological studies of functional polyurethane composite: Part 1. Rheology of polyurethane composite, its compounds with and without solid additives (aluminum flakes). *Journal of Elastomers and Plastics*, 2018; 50 (3): 222-240. <http://dx.doi.org/10.1177/0095244317715787>
3. Yakovlev S.N., Mazurin V.L. Vibroisolating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction. *Magazine of Civil Engineering*, 2017; 74(6): 53-60. <http://dx.doi.org/10.18720/MCE.74.5>
4. Oxley J.S., Smith J. L., Bakhtiyarov S.I., Baldovi P.M. Rheological studies of functional polyurethane composite with solid additives: Part 2. Rheology of polyurethane composite with solid additives (calcium iodate particles and aluminum flakes). *Journal of Elastomers and Plastics*, 2017; 50(4): 312-324. <https://doi.org/10.1177%2F0095244317729558>
5. Yakovlev, S.N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes. *Russian Engineering Research*, 2016; 04: 255-257. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X16040213>
6. Ivovich V.A. Zashchita ot vibracii v mashinostroenii [Vibration protection in mechanical engineering]. *Moscow: Mashinostroenie*, 1990; 272 p.
7. Lepetov, V.A. Raschet i konstruirovaniye rezinovykh izdelij [Calculation and Design of Rubber Products]. *Leningrad: Himiya*, 1987; 405 p.
8. Titova Y.F., Yakovlev S.N. Calculation of the frequency of own oscillations of polyurethane chock absorbers used in shipbuilding. *Marine intellectual technologies*, 2020; 50(4): 152-157. <http://dx.doi.org/10.37220/MIT.2020.50.4.056>
9. Sirotn P.V., Lebedinskij I.Yu., Zhilejkin M.M., Sysoev M.I. Stend dlya issledovaniya staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik vibrozolyatorov [Stand for investigation of static and dynamic characteristics of vibration isolators]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020; 4: 36-40.
10. Neise E., Zepp C. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse. *GAK. Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2013; 1: 23-30. https://www.researchgate.net/publication/298435256_Optische_deformationsanalyse_von_fahrzeugreifen
11. Frolov, K.V. Prikladnaya teoriya vibrozashchitnykh system [Applied theory of vibration protection systems]. *Moscow: Mashinostroenie*, 1980; 276 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юлияна Францевна Титова, кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, Тел. (921) 759-60-54; e-mail: titova-stud@yandex.ru

Yuliana F. Titova, Ph.D. (Edu), Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Material Resistance, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Locmanskaja st., 3, Tel: (921) 759-60-54; e-mail: titova-stud@yandex.ru

Станислав Николаевич Яковлев, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, тел. (921) 908-15-35; e-mail: stannik59@mail.ru

Stanislav N. Yakovlev, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Higher School of Automation and Robotics, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 195251, St. Petersburg, Polytechnic st., 29, Tel (921) 908-15-35; e-mail: stannik59@mail.ru

Людмила Викторовна Подколызина, кандидат педагогических наук, доцент, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, тел. (921) 944-88-54; e-mail: lpodkolzina17@gmail.com

Lyudmila V. Podkol'zina, Ph.D. (Edu), Associate Professor, Higher School of Automation and Robotics, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 195251, St. Petersburg, Polytechnic st., 29, Tel (921) 944-88-54; e-mail: lpodkolzina17@gmail.com

Бабанин Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, Тел. (904) 518-70-66; e-mail: nikolai-babanin@mail.ru

Nikolaj V. Babanin, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics and Material Resistance, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Locmanskaja st., 3, Tel: (904) 518-70-66; e-mail: nikolai-babanin@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 25.09.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 03.04.2022.

Научная статья

УДК 621.176, 629.036

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.049>

Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах

С.С. Гоняева¹ sofja.gonyaeva@yandex.ru, А.Н. Калмыков¹ kan@smtu.ru, В.В. Кожемякин¹ kogh2012@yandex.ru, Н.Д. Кошкин¹ nik.koshkin99@yandex.ru, Д.С. Маловик¹ dimamalovik@gmail.com, Н.А. Морозов¹ nikita.morozov99@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Работа посвящена возможности использования пароводяного струйного аппарата (ПВСА) в качестве движителя на скоростных судах.

Для достижения поставленной цели целесообразно использовать ПВСА, предназначенный для обеспечения циркуляции теплоносителя в первом контуре. Особенностью такого ПВСА является сверхкритическое течение среды в диффузоре.

Рассмотрены варианты получения водяного пара путем сжигания водорода или водородосодержащего топлива в кислороде или воздухе. В качестве водородосодержащего топлива целесообразно использовать метан или аммиак. В камеру сгорания необходимо подавать воду для того, чтобы увеличить массовую долю водяного пара в парогазовой смеси.

Установлено, что сверхкритическое течение среды в диффузоре рассматриваемого ПВСА позволяет использовать его в качестве движителя. Необходимо только так выбрать параметры ПВСА, чтобы скачка конденсации в диффузоре не было.

Ключевые слова: пароводяной струйный аппарат, движитель, критическое истечение, парогазовая смесь.

Для цитирования: Гоняева С.С., Калмыков А.Н., Кожемякин В.В., Кошкин Н.Д., Маловик Д.С., Морозов Н.А. Использование пароводяного струйного аппарата в качестве движителя на скоростных судах, Морские интеллектуальные технологии, 2022. № 2 часть 2. С. 106—110.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.049>

Use of a steam-water jet apparatus as a propulsion device on high-speed vessels

Sofya S. Gonyaeva¹ sofja.gonyaeva@yandex.ru, Andrey N. Kalmikov¹ kan@smtu.ru, Vyacheslav V. Kozhemyakin¹ kogh2012@yandex.ru, Nikita D. Koshkin¹ nik.koshkin99@yandex.ru, Dmitry S. Malovik¹ dimamalovik@gmail.com, Nikita A. Morozov¹ nikita.morozov99@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the possibility of using a steam-water jet apparatus (PVSA) as a propulsion device on high-speed ships.

To achieve this goal, it is advisable to use PVSA, designed to ensure the circulation of the coolant in the primary circuit. A feature of such a PVA is the supercritical flow of the medium in the diffuser.

Options for obtaining water vapor by burning hydrogen or hydrogen-containing fuel in oxygen or air are considered. It is advisable to use methane or ammonia as a hydrogen-containing fuel. It is necessary to supply water to the combustion chamber in order to increase the mass fraction of water vapor in the gas-vapor mixture.

It has been established that the supercritical flow of the medium in the diffuser of the PVSA under consideration makes it possible to use it as a propeller. It is only necessary to choose the PVSA parameters in such a way that there is no condensation jump in the diffuser.

Key words: steam-water jet apparatus, propulsion device, critical outflow, vapor-gas mixture.

For citation: Sofya S. Gonyaeva, Andrey N. Kalmikov, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Nikita D. Koshkin, Dmitry S. Malovik, Nikita A. Morozov, Use of a steam-water jet apparatus as a propulsion device on high-speed vessels, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 106—110.

Введение

На отечественных судах на подводных крыльях типа «Метеор» в качестве главных двигателей используются высокооборотные дизели, а в качестве движителей – гребные винты. Такая силовая установка позволяет развивать скорость хода до 65 км/ч. Как следует из работы [1] на более высокой скорости следует использовать водометные движители – то есть вместо гребных винтов использовать реактивную струю. При этом насосную

часть водометного движителя приводит дизель или газовая турбина.

Вместе с тем, реактивную струю можно создать, например, в пароводяном струйном аппарате (ПВСА).

1. Создание реактивной струи в пароводяном струйном аппарате

В классическом ПВСА со сверхзвуковым паровым соплом скачок конденсации располагается в цилиндрическом участке проточной части [2, 3]. В скачке конденсации поток тормозится, и в диффузор

поступает однофазная среда – вода. В диффузоре происходит дальнейшее торможение потока с соответствующим повышением статического давления.

В 70-ых годах прошлого века специально для первого контура был создан ПВСА с дозвуковым паровым соплом и особой формой проточной части [4].

Принцип действия ПВСА заключается в следующем (рисунок 1).

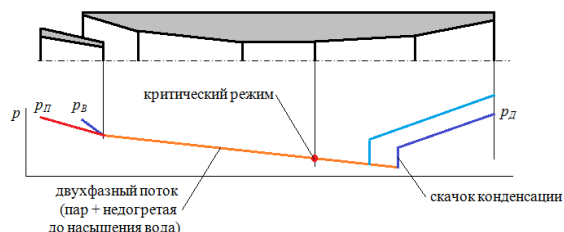


Рис. 1. Принцип действия ПВСА

Пар и вода разгоняются в соплах до невысоких скоростей и поступают в конфузорный участок проточной части. За срезом парового сопла движется неравновесный двухфазный поток – смесь пара и недогретой до насыщения воды. Благодаря особой форме проточной части полная конденсация пара в конфузоре не происходит. В конфузоре происходит дальнейший разгон двухфазной смеси и выравнивание скоростей воды и пара.

На выходе из цилиндрического участка проточной части ПВСА устанавливается критическое течение двухфазной смеси. В диффузоре продолжается снижение статического давления и дальнейший разгон двухфазной смеси, при этом в диффузоре устанавливается сверхкритическое течение. В некотором сечении диффузора происходит скачок конденсации, в котором резко повышается статическое давление. За скачком конденсации в диффузоре происходит торможение воды с соответствующим повышением статического давления.

Массовый расход воды на ПВСА определяется уравнением [5].

$$G_B = f_{KC} \frac{1414A}{1 + \frac{1}{u} \sqrt{\frac{v''}{v'}}} \sqrt{p_B} \cdot \left[1 - \left(\frac{T_D}{T'} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right], \quad (1)$$

где: G_B – массовый расход воды на водяное сопло, кг/с; f_{KC} – площадь поперечного сечения цилиндрического участка проточной части, м²; u – коэффициент инжекции (отношение массового расхода воды к массовому расходу пара); v – удельный объем, м³/кг; p_B – давление воды на входе в ПВСА, МПа; T' – температура насыщения при давлении p_B , К; T_D – температура воды на выходе из диффузора, К; n – показатель политропы; A – эмпирический коэффициент.

Расход ПВСА определяется параметрами воды и пара на входе в ПВСА и, в определенных пределах, не зависит от противодавления (при повышении противодавления скачок конденсации смещается к входу в диффузор, при понижении – наоборот). В

этом смысле напорная характеристика такого ПВСА похожа на характеристику объемного насоса.

Многочисленные экспериментальные исследования [6-9] подтвердили работоспособность и характеристики таких ПВСА. В частности, на основе экспериментов было рекомендовано для показателя политропы значение 1,13.

Кроме того, эксперименты подтвердили геометрическое подобие проточных частей.

Поскольку тяга, создаваемая реактивной струей, равна произведению массового расхода на скорость истечения относительно окружающей среды, то сверхкритическое течение среды в диффузоре рассматриваемого ПВСА делает его особенно привлекательным как движителя. Необходимо, однако таким образом выбирать параметры ПВСА, чтобы скачка конденсации в диффузоре не было.

2. Получение водяного пара

Самый экологически чистый способ получения водяного пара – сжигать водород в среде кислорода. Однако в этом случае на судне необходимо хранить запасы водорода и кислорода.

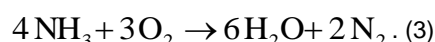
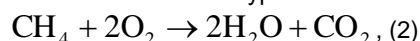
Можно в камеру сгорания подавать водородосодержащее топливо и воздух. В этом случае в паровое сопло ПВСА будет поступать смесь водяного пара, азота и других газов. Наличие в проточной части неконденсируемых газов существенно снижает эффективность скачка конденсации и напор ПВСА. Однако если ПВСА работает как движитель, в его диффузоре нет скачка конденсации, и ПВСА является гидравлическим сопротивлением. В этом случае влияние неконденсируемых газов на напор, очевидно, можно не принимать во внимание.

В качестве топлива можно использовать метан или аммиак. Эти газы удобно хранить в жидком виде. Аммиак токсичен, но его сжигание не сопровождается выбросами окислов углерода в атмосферу. Кроме того, аммиак хорошо растворяется в воде, и можно исключить попадание его в атмосферу.

В любом случае при сжигании водорода, метана, аммиака или другого топлива в кислороде или воздухе получается парогазовая смесь с высокой температурой. Выполненные ранее исследования показали, что наличие влаги в паре ухудшает работу ПВСА. В то же время перегрев пара практически не сказывается на работе ПВСА. Поэтому в камеру сгорания следует подавать воду – это снизит температуру парогазовой смеси и увеличит долю пара.

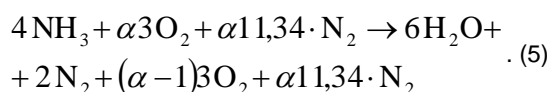
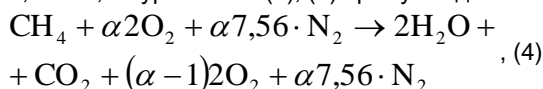
Увеличение доли водяного пара в парогазовой смеси приводит к повышению температуры насыщения и, в соответствии с формулой (1), к резкому увеличению расхода воды, скорости истечения парогазоводяной смеси из ПВСА и тяги.

Сгорание метана и аммиака в камере сгорания описывается соответственно уравнениями:



Объемная доля и, соответственно, парциальное давление водяного пара в продуктах сгорания аммиака выше.

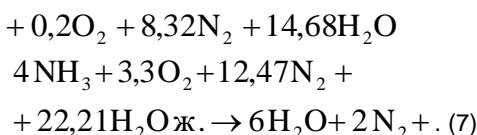
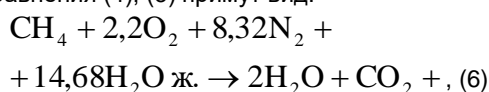
Если принять, что в качестве окислителя используется воздух с массовым составом 23,2% O₂ и 76,8% N₂, то уравнения (2), (3) примут вид:



где α – коэффициент избытка воздуха.

При $\alpha = 1,1$ объемное содержание водяного пара в продуктах сгорания составляет соответственно 0,174 и 0,289.

Теплота сгорания метана выше, поэтому и воды в камере сгорания может испариться больше. Если на выходе из камеры сгорания энтальпия водяного пара равна i'' при парциальном давлении водяного пара, то уравнения (4), (5) примут вид:



С учетом воды, подаваемой в камеру сгорания, объемное содержание водяного пара в продуктах сгорания составляет соответственно 0,637 и 0,656.

3. Подогрев воды на входе в ПВСА

ПВСА эффективно работает в узком диапазоне температур – недогрев воды до насыщения за диффузором должен лежать в диапазоне от 10 до 30 К.

При повышении температуры воды на входе в ПВСА можно уменьшить коэффициент инжекции, что обычно положительно сказывается на характеристиках ПВСА. Однако в данном случае повысить температуру воды на входе в ПВСА можно только за счет теплоты, получаемой в камере сгорания (рисунок 2).

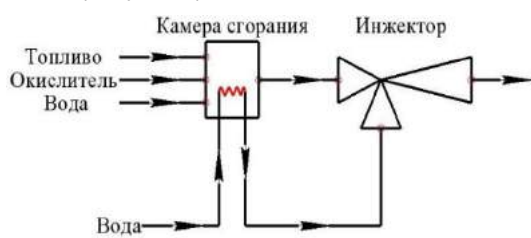


Рис. 2. Схема установки

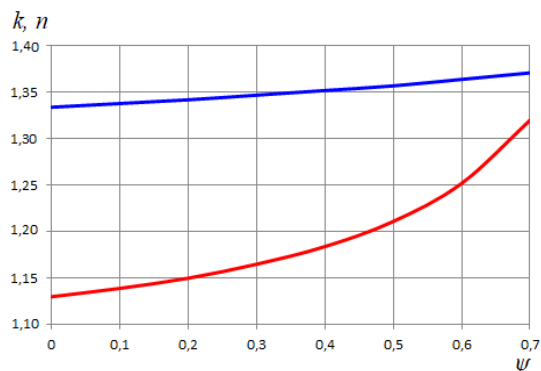
Одновременно будет уменьшаться расход воды, подаваемой в камеру сгорания. Предварительные расчеты показывают, что подогрев воды за счет теплоты камеры сгорания отрицательно сказывается на тяге.

4. Показатель политропы

Водяной пар, разгоняя воду в проточной части ПВСА, совершает работу. Если в проточной части движется не водяной пар, а парогазовая смесь, то работу совершает не только трехатомный водяной

пар, но и неконденсируемые газы, в том числе двухатомные. Это приводит к тому, что коэффициент адиабаты парогазовой смеси увеличивается. Если принять, что парогазовая смесь совершает такую же работу по разгону воды, что и водяной пар, то это приведет к увеличению показателя политропы. Это иллюстрирует рисунок 3.

В свою очередь увеличение показателя политропы приводит к уменьшению подкоренного выражения в формуле (1) и, соответственно, уменьшению расхода воды.



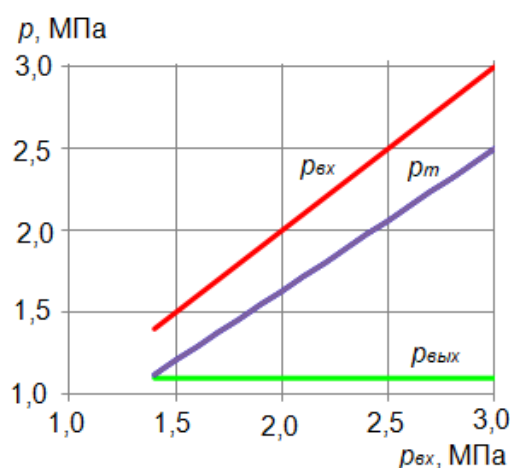
Синяя линия – показатель адиабаты; красная линия – показатель политропы

Рис. 3. Зависимость показателей адиабаты k и политропы n от массовой доли воздуха в паровоздушной смеси ψ

5. Распределение давления в проточной части ПВСА

Для того чтобы истечение из диффузора ПВСА было сверхкритическим, статическое давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения должно быть больше давления окружающей среды.

Соотношение давления в ПВСА представлено на рисунке 4.



Красная линия – давление на входе в ПВСА; синяя линия – давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения; зеленая линия – давление за диффузором

Рис. 4. Распределение давления по проточной части ПВСА

Данные получены для ПВСА работающего на глубине 110 м (экспериментально доказана работоспособность ПВСА с дозвуковым паровым соплом до 10 МПа).

При давлении на входе в ПВСА 1,4 МПа давление на выходе из цилиндрического участка камеры смешения равно 1,1 МПа, то есть равно давлению окружающей среды. Диффузор будет отсутствовать.

Заключение

ПВСА с дозвуковым соплом, благодаря сверхкритическому течению двухфазного потока в

диффузоре, может быть использован в качестве реактивного движителя.

Водяной пар для работы ПВСА может быть получен путем сжигания водорода или водородосодержащего топлива (метан, аммиак) в среде кислорода или воздуха.

В камеру сгорания необходимо подавать воду для того, чтобы увеличить массовую долю водяного пара в парогазовой смеси.

Литература

1. Зайцев Н.А., Маскалик А.И. Отечественные суда на подводных крыльях // Ленинград: Изд-во Судостроение, 1967.
2. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
4. Рыльцов Н.А., Саловатов Е.Х., Шаманов Н.П. Струйный насос: пат. 2116522 / Заявитель и Патентообладатель СПбГМТУ; заявл. 22.10.1996; опуб. 27.07.1998. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 1996;
5. Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. – Л.: Судостроение, 1989.
6. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Алексеенко И.М. Полунатурный стенд для экспериментальных исследований судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета» // Морской Вестник. 2011, № 2(38), с. 47-48.
7. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Андреев А.Г., Экспериментальные исследования на полунатурном стенде судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета-К» на приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морской Вестник. 2012, № 2(42), с. 29-31.
8. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морские интеллектуальные технологии. 2018, № 4 (42) т. 1, с. 115 – 123.
9. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Тихомиров Б.А., Русаков Е.С. Экспериментальное исследование систем пассивного отвода тепла с ПВСА для реакторных установок // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4 (46) т. 1, с. 123 – 129.

References

1. Zajcev N.A., Maskalik A.I. Otechestvennyye suda na podvodnyh kryl'yah [Domestically produced hydrofoil craft]. Leningrad: Izd-vo Sudostroenie, 1967.
2. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Strujnye apparaty [Inkjet devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1989.
3. Tsegelsky V.G. Strujnye apparaty [Inkjet devices]. Bauman Moscow State Technical University, 2017.
4. Ryl'tsov N.A., Salovatov E.Kh., Shamanov N.P. Strujnyj nasos [Jet pump]. Patent RU 2116522 C1. Applicant and patent holder SPBSMTU; filed 22.10.1996; published 27.07.1998. Federal service for Intellectual property, patents and trademarks of the Russian Federation, 1996.
5. Shamanov N.P., Dyadik A.N., Labinsky A.Yu. Dvuhfaznye strujnye apparaty [Two-phase jet devices]. Leningrad: Shipbuilding, 1989.
6. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyansky V.B., Alekseenko I.M. Polunaturnyj stand dlja eksperimental'nyh issledovaniy sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodjashhego agregata «Beta» [Semi-natural stand at the Maritime Training-Scientific Base of the SPBSMTU for experimental studies of ship's nuclear mono block steam generating unit «Beta»]. Morskoy Vestnik. 2011, № 2(38), s. 47-48.
7. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyansky V.B., Andreev A.G. Eksperimental'nye issledovaniya na polunaturnom stende sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashhego agregata «Beta-K» na primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU [Experimental studies on seminatural stand of marine nuclear monoblock steam-generating unit «Beta-K» at the primorskaya training and research base of the SPBSMTU]. Morskoy Vestnik. 2012, № 2(42), s. 29-31.
8. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. Eksperimental'nye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na Primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU [Experimental studies of the passive heat removal system at the Primorsk educational and scientific base of St. Petersburg State Marine Technical University (SPBSMTU)]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018, № 4 (42) t. 1, s. 115 – 123.
9. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Tikhomirov B.A., Rusakov E.S. Eksperimental'noe issledovanie sistem passivnogo otvoda tepla s PVSA dlya reaktornykh ustanovok [Experimental investigations of the passive heat removal systems for reactor installations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019, № 4 (46) t.1, s. 123 – 129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Софья Сергеевна Гоняева, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

Андрей Николаевич Калмыков, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры СЯВЭ, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kan@smtu.ru

Вячеслав Вячеславович Кожемякин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Никита Дмитриевич Кошкин, студент группы 2163, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nik.koshkin99@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Маловик, студент группы 2263, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dimamalovik@gmail.com

Никита Александрович Морозов, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Sofya S. Gonyaeva, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru

Andrey N. Kalmikov PhD (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3 e-mail: kan@smtu.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, the head of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogh2012@yandex.ru

Nikita D. Koshkin, student, group 2163, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nik.koshkin99@yandex.ru

Dmitry S. Malovik, student, group 2263, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: dimamalovik@gmail.com

Nikita A. Morozov, assistant of department of ship nuclear and hydrogen energetics, State marine technical university of St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikita.morizov99@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.04.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.04.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 26.04.2022.

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

Научная статья

УДК 534.13

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.050>

Малогобаритная гидроакустическая антенна подводного аппарата

Э.В. Ермолаев¹ erehdik@mail.com, В.И. Махов² vimahov@mail.ru

¹Концерн «Океанприбор», ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье предлагается малогабаритная гидроакустическая антенна, предназначенная для использования на подводном аппарате. Антенна выполнена в виде концентрической трёхкольцевой дискретной антенны, при этом площадь, занимаемая ею на подводном аппарате, меньше, чем в случае применения линейной антенны, кроме того, характеристика направленности (ХН) её близка к осесимметричной, что важно в ряде практических применений. Целью работы был расчёт ХН по известным выражениям при различных амплитудных распределениях (равномерное, треугольное, Хэмминга, Блэкмана) возбуждения элементов, расположенных на кольцах антенны, и выбор оптимального варианта. В качестве элементов антенны применены трёхсекционные стержневые преобразователи асимметричной, обеспечивающей широкополосность преобразователя, конструкции. Расчёт ХН выполнен для средней частоты широкого диапазона частот, приведены графики рассчитанных ХН при заданных распределениях. Известны результаты работы, где показано, что при большом количестве колец (10 колец, 320 элементов в антенне) уменьшение амплитуды возбуждения колец от центрального к периферийному кольцу приводит к тому, что основной лепесток ХН несколько расширяется и уменьшаются боковые лепестки. В данной работе показано, что при малом числе колец (3 кольца) такой эффект не наблюдается, и этот результат объясняется с применением теоремы смещения. Оптимальным из рассмотренных амплитудных распределений для данной трёхкольцевой концентрической антенны является равномерное амплитудное распределение, при котором антенна имеет наиболее узкий лепесток ХН и меньший уровень боковых лепестков.

Ключевые слова: гидроакустическая антенна, концентрическая трёхкольцевая антенна, характеристика направленности, боковые лепестки, ширина основного лепестка, амплитудное распределение.

Для цитирования: Ермолаев Э.В., Махов В.И. Малогабаритная гидроакустическая антенна подводного аппарата, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 111—114.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.050>

All-sized hydroacoustic antenna of an underwater vehicle

Edward V. Ermolaev¹ erehdik@mail.com, Vladimir I. Makhov² vimahov@mail.ru

¹"Concern "Oceanpribor", St. Petersburg, Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Annotation. The article proposes a small-sized hydroacoustic antenna designed for use on an underwater vehicle. The antenna is made in the form of a concentric three-ring discrete antenna, while the area occupied by it on an underwater vehicle is smaller than in the case of a linear antenna, in addition, its directivity characteristic (DC) is close to axisymmetric, which is important in a number of practical applications. The aim of the work was to calculate the DC using known expressions for various amplitude distributions (uniform, triangular, Hamming, Blackman) of the excitation of elements located on the antenna rings, and to choose the optimal option. Three-section rod converters of an asymmetric design providing the broadband of the converter are used as antenna elements. The calculation of DC is performed for the average frequency of a wide frequency range, graphs of the calculated XN for given distributions are given. The results of the work are known, where it is shown, that with a large number of rings (10 rings, 320 elements in the antenna), a decrease in the amplitude of the excitation of the rings from the central to the peripheral ring leads to the fact that the main lobe of the DC expands somewhat and the side lobes decrease. In this paper, it is shown that with a small number of rings (3 rings), such an effect is not observed, and this result is explained using the displacement theorem. The optimal of the considered amplitude distributions for this three-ring concentric antenna is a uniform amplitude distribution, in which the antenna has the narrowest lobe of the DC and a lower level of side lobes.

Keywords: hydroacoustic antenna, concentric three-ring antenna, directional characteristic, side lobes, width of the main lobe, amplitude distribution.

For citation: Ermolaev E.V., Makhov V.I. Small-sized hydroacoustic antenna of an underwater vehicle, Marine intelligent technologies. 2022. № 2 part 2. P. 111—114.

Введение

В работе рассмотрена малогабаритная дискретная концентрическая трёхкольцевая антенна

с центрами элементов, приведенными на рис.1. Элементы антенны распределены на три кольца по 8, 12 и 16 элементов в кольце. Излучение и приём звуковых волн антенной предполагается в направлении полупространства с осью OZ, ХН

концентрической антенны близка к осесимметричной.

Волновые размеры антенны невелики, радиусы окружностей, на которых расположены элементы антенны: $R_1/\lambda \approx 1$, $R_2/\lambda \approx 1,6$ и $R_3/\lambda \approx 2,2$, где λ – длина звуковой волны на средней частоте. Для увеличения ширины полосы пропускания в качестве элементов рассматриваемой антенны применены трёхсекционные стержневые преобразователи асимметричной конструкции, обеспечивающей их широкополосность (с лёгкой передней приёмно-излучающей накладкой и более тяжёлой тыльной накладкой).

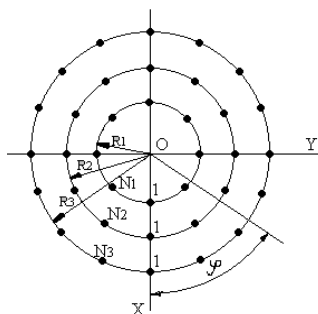


Рис. 1. Расположение центров элементов в антенне

Передние накладки круглой формы с волновым размером диаметра $\approx 0,5 \lambda$ не имеют изгибных колебаний, уменьшающих эффективность антенны [1,2]. Передние накладки преобразователей расположены в плоскости XOY, расстояния r между центрами соседних накладок как на окружностях, так и по радиусу находятся в пределах $\lambda > r > \lambda/2$.

Результаты расчётов ХН антенны

ХН кольцевой антенны из точечных элементов определяется выражением [3]:

$$R(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \exp[jkR_m(\sin\theta \cos(\varphi - \varphi_n) - \sin\theta_k \cos(\varphi_k - \varphi_n))],$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, N – число элементов в кольце, R_m – радиус m -го кольца, θ и φ – угол места и азимутальный угол в сферической системе координат с центром в точке O , φ_n – угол между осью OX и направлением на элемент с номером n , при $n=1$ элемент расположен на оси OX , θ_k и φ_k – направление компенсации антенны.

На рис.2 приведены графики ХН колец из 8, 12 и 16 точечных элементов, рассчитанных для плоскости $\varphi = 0^\circ$.

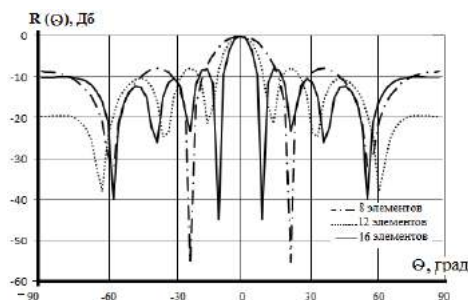


Рис.2.Графики ХН колец из 8, 12, и 16 элементов

ХН однокольцевых антенных решеток имеют довольно высокий уровень первого бокового

максимума (-8дБ). ХН всей концентрической антенны из 3 колец образуется в соответствии с теоремой сложения как сумма ХН кольцевых антенн, имеющих общий фазовый центр[3,4]:

$R_{sum} = (R_1 + R_2 + R_3)/3$. С увеличением количества колец уровень боковых лепестков всей антенны уменьшается. На рис. 3 приведены графики рассчитанной ХН дискретной трёхкольцевой антенны в двух плоскостях $\varphi = 0$ градусов и $\varphi = 45$ градусов, а также - ХН сплошной антенны в виде круга, радиус которого равен радиусу окружности, на которой расположены 16 элементов. ХН кольцевой концентрической антенны при малом количестве колец (в данном случае $M = 3$) не является идеально осесимметричной. ХН антенны в двух плоскостях $\varphi = 0$ градусов и $\varphi = 45$ градусов имеют разные величины боковых лепестков. В плоскостях $\varphi = 90$ градусов и $\varphi = 0$ градусов ХН антенны имеет одинаковую форму в силу симметрии антенны относительно осей OX и OY . При других углах φ график ХН антенны не выходит за пределы приведённых на рис. 3 графиков ХН в плоскостях $\varphi = 0$ и $\varphi = 45$ градусов.

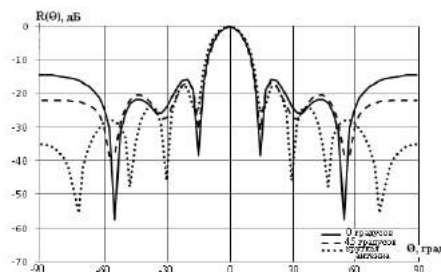


Рис. 3. Графики ХН трёхкольцевой антенны ($\varphi = 0$ градусов- непрерывная линия и $\varphi = 45$ градусов- пунктирная линия) и ХН сплошной антенны в виде круга, радиус которого равен радиусу окружности, на которой расположены 16 элементов (линия из точек).

Уровень первого бокового максимума ХН трёхкольцевой антенны составляет – 14 Дб, то есть на 6 дБ меньше, чем соответствующий уровень однокольцевых антенн. Основные максимумы ХН трёхкольцевой антенны и антенны в виде круга практически совпадают, уровень бокового поля антенны в виде круга меньше, чем у трёхкольцевой антенны.

Таким образом, ХН рассматриваемой трёхкольцевой антенны близка к осесимметричной.

Известным методом, влияющим на вид ХН линейной антенны (ширину основного лепестка, величину боковых максимумов), является применение амплитудного распределения возбуждения элементов, например, спадающего от центра к краям антенны. В работах [4-8] рассмотрено влияние различных амплитудных распределений на ХН многокольцевой концентрической антенны при большом количестве элементов. Так, например, в работе [8] на внутреннем кольце число элементов $N_1 = 5$, на каждом кольце большего диаметра число элементов увеличивается на 6 элементов, и при количестве колец $M = 10$ общее число элементов в антенне составляет 320, что намного превышает число элементов в рассматриваемой антенне. В работе [8] показано, что амплитудные распределения (треугольное, Хэмминга, Хэннинга, Блэкмана, биномиальное) приводят к расширению основного лепестка ХН и уменьшению боковых

лепестков, то есть результат совпадает с результатом применения спадающего распределения на линейной антенне. Для данной трёхкольцевой антенны также были рассчитаны ХН при некоторых распределениях амплитуды, спадающей от центрального кольца к периферийному:

- треугольном распределении

$$a_m = \frac{M-m+1}{M},$$

- распределении Хэмминга

$$a_m = 0,54 - 0,46 \cos\left[\frac{\pi(m-M-2)}{M+1}\right],$$

- распределении Блэкмана

$$a_m = 0,42 - 0,5 \cos\left[\frac{\pi(m-M-2)}{M+1}\right] + 0,08 \cos\left[\frac{2\pi(m-M-2)}{M+1}\right].$$

Коэффициенты распределений при M=3:

- равномерное: 1; 1; 1,

- треугольное: 1; 0,667; 0,333,

- Хэмминга: 1; 0,865; 0,54,

- Блэкмана: 1; 0,774; 0,42.

На рис. 4 приведены ХН, рассчитанные при заданных амплитудных распределениях.

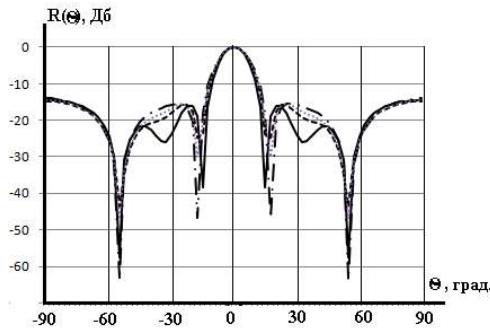


Рис. 4. ХН при распределениях (— равномерное, Блэкмана, ---- Хэмминга, - · - - - треугольное)

В таблице 1 приведены значения ширины основного лепестка ХН при различных амплитудных распределениях.

Табл.1

Амплитудноераспределение	Ширина основного лепестка ХН по уровню 0,7 (в градусах)
Равномерное	12,6
Треугольное	14,6
Хэмминга	13,8
Блэкмана	22

Из таблицы 1 и рис. 4 видно, что по сравнению с равномерным все используемые распределения привели к расширению основного лепестка ХН, нет уменьшения боковых лепестков в широком секторе углов, как это теоретически должно быть для линейной эквидистантной антенны со спадающим от центра к краям амплитудным распределением.

Такой результат объясняется следующим образом. В соответствии с теоремой смещения данная концентрическая антенна сравномерным распределением в плоскости $\varphi = 0$ градусов эквивалентна линейной неэквидистантной антенне (рис.5) со сложным распределением амплитуды от центра к краю: 6; 2; 2; 2; 1; 2; 2; 1; 2; 1. С амплитудным распределением Хэмминга по кольцам 1; 0,865; 0,54 эквивалентная линейная антенна будет иметь распределение:

4,81; 1; 1,73; 1,08; 1; 1,73; 1,08; 1; 1,08; 1.

Неэквидистантное расположение элементов эквивалентной линейной антенны и сложное амплитудное распределение с резкими изменениями амплитуды то к большему, то к меньшему значению (в отличие от плавного её уменьшения от центра к краям) не приводит к уменьшению боковых лепестков рассматриваемой трёхкольцевой антенны.

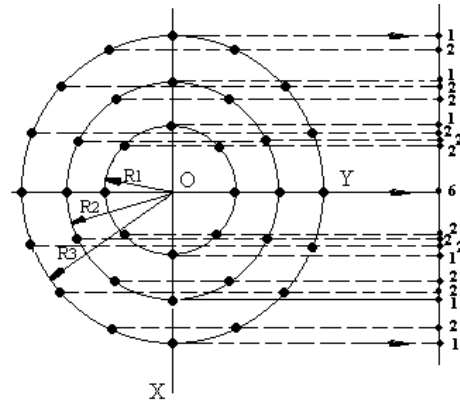


Рис. 5. Применение теоремы смещения для трёхкольцевой антенны, справа цифрами приведено амплитудное распределение эквивалентной линейной антенны

Равномерное распределение обеспечивает наименьшую ширину основного лепестка. Кроме того, равномерное распределение менее чувствительно к случайным ошибкам возбуждения элементов и обеспечивает наибольший коэффициент концентрации антенны [9, 10].

Все преобразователи в антенне имеют одинаковые круглые приёмно-излучающие поверхности и, соответственно, осесимметричные ХН, определяемые выражением:

$$R_n(\Theta) = 2J_1(ka \sin\Theta)/(ka \sin\Theta),$$

где $2J_1(\xi)/(\xi)$ – функция Бесселя, отношение радиуса накладки к длине волны $a/\lambda=0,25$.

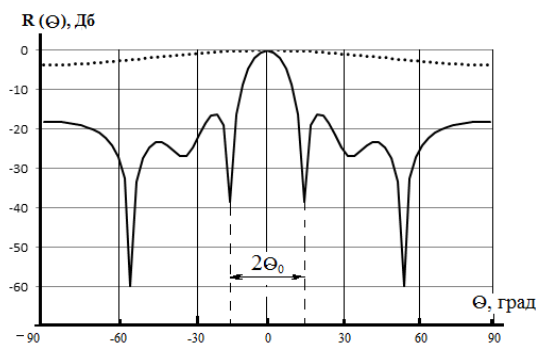


Рис. 6. ХН антенны из 3 колец (8+12+16 преобразователей) и ХН преобразователя (линия из точек)

На рис.6 приведены ХН преобразователя и ХН трёхкольцевой антенны с учётом направленности преобразователя при равномерном амплитудном распределении. Ширина основного максимума ХН антенны по уровню -3 дБ составляет $2\Theta_{0,7} = 12^\circ$, угол $2\Theta_0 = 30^\circ$.

Заключение

Предложена малогабаритная гидроакустическая трёхкольцевая концентрическая антенна для подводного аппарата. Рассчитаны ХН антенны

при различных амплитудных распределениях возбуждения колец. Оптимальным из рассмотренных распределений для данной антенны является равномерное.

Показано, что ХН такой антенны близка к осесимметричной.

Литература

1. Ермолаев Э.В., Махов В.И. Исследование колебаний пьезокерамического стержня с накладкой круглой и квадратной формы, журнал «Морские интеллектуальные технологии», СПб ГМТУ, 2(44) т.1, 2019, с.206-209.
2. Ермолаев Э.В., Махов В.И. Анализ работы и расчёт пьезокерамического стержня с накладкой при использовании конечно-элементного моделирования. Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск 2, 2019, с.263-268.
3. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решёток. ГОУВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара, 2011.
4. Balanis C.A., Antenna Theory-Analyze and Deign, Third Edition, A JOHN WILEY & SONS, Inc., Publication, 2005.
5. H.A. Sharshar, Sine Alpha Tapered Beamforming Window for Uniform Concentric Circular Array using in High Altitude Platform System. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3, Issue 7, July 2014.
6. M. Dessouky, H. Sharshar, Y. Albagory. Novel Tapered Beamforming Window for Uniform Concentric Circular Arrays. Published online: 03 Apr. 2012.
7. Albagory. Analysis of Sidelobe Level and Beamwidth of Uniform Concentric Circular Arrays Utilizing Kaiser Amplitude Weighting. Int. J. of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 3, Issue 9, 2014.
8. M. Nofal, S. Aljahdali, Y. Albagory. Tapered beamforming for concentric ring arrays, Int. J. Electr. Com. 67, 2013.
9. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны, Л., Судостроение, 1984.
10. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчёты в гидроакустике. Л., Судостроение, 1988.

References

1. Ermolaev E.V., Mahov V.I. Issledovanie kolebanij p'ezokeramicheskogo stержnya s nakladkoj krugloj i kvadratnoj formy [Investigation of vibrations of a piezoceramic rod with a round and square overlay], zhurnal «Morskie intellektual'nye tekhnologii» SPbGMTU, 2(44) t.1, 2019, s.206-209.
2. Ermolaev E.V., Mahov V.I. Analizraboty i raschyot p'ezokeramicheskogostержnya s nakladkoj pri ispol'zovanii konechno-elementnogo modelirovaniya [Analysis of the operation and calculation of a piezoceramic rod with an overlay using finite element modeling]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. Special'nyjvypusk 2, 2019, s.263-268.
3. Kubanov V.P. Napravlennye svoystva antennyh reshyotok [Directional properties of antenna arrays]. GOUVPO «Povolzhskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij i informatiki», g. Samara, 2011.
4. Balanis C.A., Antenna Theory-Analyze and Deign, Third Edition, A JOHN WILEY & SONS, Inc., Publication, 2005.
5. H.A. Sharshar. Sine Alpha Tapered Beamforming Window for Uniform Concentric Circular Array using in High Altitude Platform System. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3, Issue 7, July 2014.
6. M. Dessouky, H. Sharshar, Y. Albagory. Novel Tapered Beamforming Window for Uniform Concentric Circular Arrays. Published online: 03 Apr. 2012.
7. Albagory. Analysis of Sidelobe Level and Beamwidth of Uniform Concentric Circular Arrays Utilizing Kaiser Amplitude Weighting. Int. J. of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 3, Issue 9, 2014.
8. M. Nofal, S. Aljahdali, Y. Albagory. Tapered beamforming for concentric ring arrays, Int. J. Electr. Com. 67, 2013.
9. Smaryshev M.D., Dobrovolskij YU.YU. Gidroakusticheskie anteny [hydroacoustic antennas], L., Sudostroenie, 1984.
10. Evtjutov A.P., Mit'ko V.B. Inzhenernye raschyoty v gidroakustike [engineering calculations in hydroacoustics]. L., Sudostroenie, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Эдуард Витальевич Ермолаев, инженер 2 категории «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, пр. Чкаловский, 46, e-mail: erehdik@mail.com.

Eduard V. Ermolaev, Engineer of the 2nd category, Okeanpribor Concern, 46. Chkalovsky Ave., Saint Petersburg, e-mail: erehdik@mail.com.

Владимир Иванович Махов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vimahov@mail.ru.

Vladimir I. Makhov, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Information Systems and Technologies of the St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya str., 3, e-mail: vimahov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.01.2021
 Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.01.2022
 Принята к публикации/accepted for publication 16.05.2022

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 537.84

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.051>

Роль масштабного фактора, при взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей.

С.Ю. Маламанов¹ stevmal@mail.ru, В.А. Павловский² v.a.pavlovsky@gmail.com

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Изучение взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей с помощью математического моделирования является актуальной и важной как чисто научной, так и прикладной задачей. основополагающие работы в этом направлении принадлежат Гейзенбергу, Паркеру и Каулингу. В нашей стране в этом направлении активно работали Я.Б. Зельдович, С.И. Брагинский, Г.А. Любимов, А.Г. Куликовский [1-4]. Нелинейный характер уравнений магнитной гидродинамики позволяет получать аналитические решения только в редких частных случаях. Трудности в поиске аналитических решений магнитогидродинамических задач и неотложные задачи практики сделали весьма привлекательным численное моделирование, которое с помощью новейших компьютерных технологий дают возможность ставить и решать многие комплексные научные и технические задачи.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования, направленные на изучение взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей с помощью модуля ANSYS.CFX. Модельная постановка задачи позволяет лучше понять определённые аспекты этого взаимодействия.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, скорость потока, разность потенциалов, магнитное поле, математическая модель.

Для цитирования: Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Роль масштабного фактора, при взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 115—118.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.051>

The role of the scale factor in the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields

Stepan Y. Malamanov¹ stevmal@mail.ru,

Valery A. Pavlovsky² v.a.pavlovsky@gmail.com

¹ Baltic State Technical University "VOENMEKH" them. Ustinov, ² St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

Annotation. The study of the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields with the help of mathematical modeling is a topical and important task, both purely scientific and applied. The fundamental works in this direction belong to Heisenberg, Parker and Cowling. In our country, Ya.B. Zel'dovich, S.I. Braginsky, G.A. Lyubimov, A.G. Kulikovskiy [1-4]. The non-linear nature of the equations of magnetohydrodynamics makes it possible to obtain analytical solutions only in rare special cases. Difficulties in finding analytical solutions to magnetohydrodynamic problems and urgent practical problems have made numerical modeling very attractive, which, using the latest computer technologies, makes it possible to set and solve many complex scientific and technical problems.

This paper presents the results of numerical simulation aimed at studying the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields using the ANSYS.CFX module. The model formulation of the problem allows us to better understand certain aspects of this interaction.

Keywords: numerical simulation, conductive liquid, flow velocity, potential difference, magnetic field, mathematical model.

For citation: Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovskiy. The role of the scale factor in the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 115—118.

Введение

Сложный характер взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей обуславливает необходимость рассмотрения достаточно упрощенных моделей, которые, однако, улавливают суть и описывают основные

закономерности изучаемых явлений. Возникающие при этом эффекты существенно нелинейны. Понять их механизмы – как правило, в отсутствие достоверных натуральных наблюдений – возможно только из решения соответствующих уравнений. Точные аналитические решения дифференциальных уравнений продолжают играть огромную роль в

формировании правильного понимания изучаемых явлений и процессов, именно они позволяют определить области изменения характерных параметров, при которых возможны те или иные существенные эффекты. Это особенно актуально для магнитной гидродинамики, уравнения которой представляют собой значительно более сложную нелинейную систему уравнений, чем уравнения электродинамики и гидродинамики, взятые по отдельности. Максимальный эффект взаимодействия достигается при взаимной перпендикулярности векторов скорости потока и индукции магнитного поля. В наиболее общем случае таких вариантов два – линейное магнитное поле при круговом движении проводящей жидкости, а также тороидальное магнитное поле при прямолинейном движении жидкости. С масштабной точки зрения, наиболее простой моделью, в которой можно обеспечить взаимную перпендикулярность векторов \mathbf{V} и \mathbf{B} , является течение в ограниченном кольцевом зазоре двух соосных цилиндров (рисунок 1),

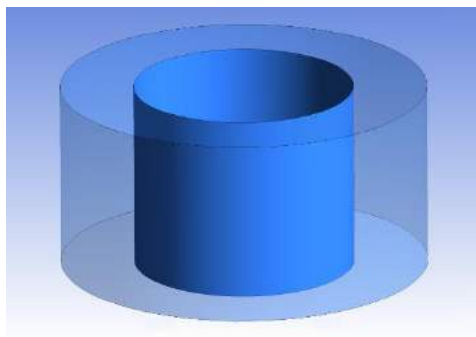


Рис. 1. Кольцевой зазор между двумя соосными цилиндрами.

где между поверхностями поддерживается разность потенциалов, обуславливающая электрический ток, а в кольцевом зазоре приложено тороидальное магнитное поле, как показано на рисунке 2:

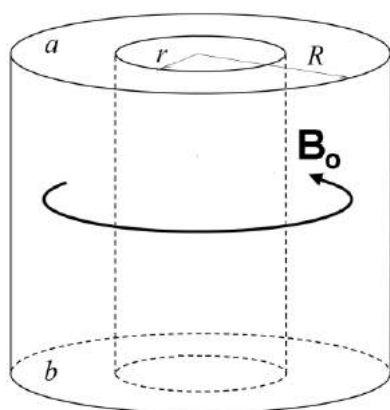


Рис. 2. Схема приложения магнитного поля

Моделирование течения жидкости в кольцевом зазоре соосных цилиндров

Моделирование проводилось с помощью гидродинамического модуля ANSYS.CFX. Соответствующая система уравнений и некоторые особенности постановки подобного рода задач рассмотрены в работе [6]. Проводящей жидкостью, находящейся в зазоре, является морская вода (удельная проводимость $\sigma = 5 \text{ См/м}$). Между поверхностями цилиндров действует электрическое поле, потенциал внутреннего цилиндра равен 200 В, а внешнего – 0 В. Индукция магнитного поля принимается равной $B_0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$, что в десять раз больше, чем индукция геомагнитного поля Земли.

Возникающая в описанных условиях электромагнитная сила направлена вверх, и характер движения жидкости зависит от того, чем являются плоскости (a) и (b) – стенками или свободными поверхностями (силу тяжести для упрощения анализа не учитываем). Если обе поверхности – твердые стенки, получается замкнутый объем, в котором жидкость вращается в вертикальных плоскостях, образуя торообразную фигуру. Она поднимается вдоль внутренней стенки и опускается вдоль внешней. В случае, когда плоскости – свободные поверхности, тогда нашу систему можно рассматривать как ускоритель. При выбранных направлениях электрического и магнитного полей электромагнитная сила будет направлена вверх (плоскость (a)), куда и начнет двигаться жидкость. Распределения скорости в средней (горизонтальная плоскость симметрии) и верхней части объема (вниз по потоку) приведены на графике рисунка 3:

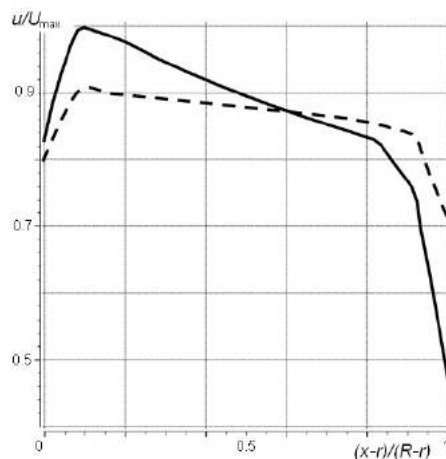


Рис. 3. Распределение относительной скорости в верхней и средней части объема

На этом рисунке сплошная кривая соответствует верхней части канала, а штриховая – средней; U_{\max} – максимальная скорость жидкости в рассматриваемом объеме; относительное расстояние, отсчитывается вдоль радиуса R , в горизонтальной плоскости симметрии.

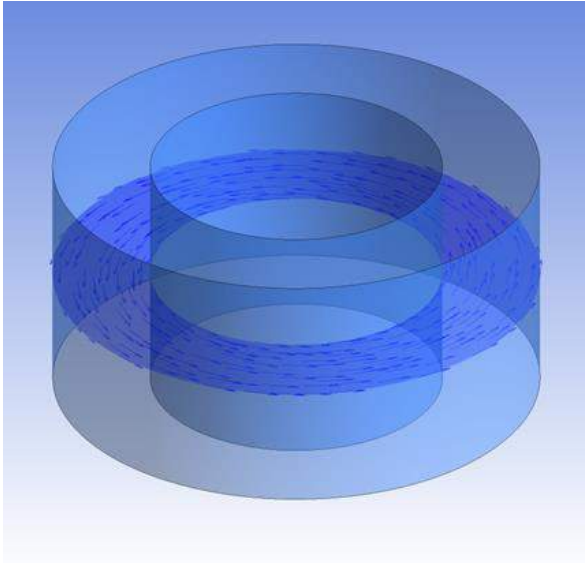


Рис. 4 Вектора индукция внешнего магнитного поля

На рисунке 4 показаны вектора индукции внешнего магнитного поля в горизонтальной плоскости симметрии.

Теперь обратим внимание на масштабный фактор. Уменьшим все геометрические размеры, например, в 2 раза. На рисунках 5 и 6 сплошная кривая 1 – соответствует исходной геометрии, штриховая кривая 2 – при уменьшении всех размеров в 2 раза.

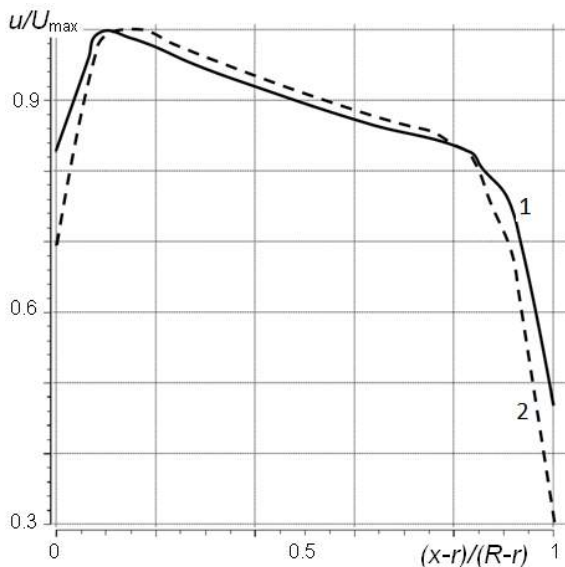


Рис. 5 Распределение скорости в выходном сечении канала при изменении линейных размеров системы.

Скорость в выходном сечении при этом практически не изменяется, хотя сам профиль небольшое изменение претерпевает. Поэтому, в рассматриваемой нами системе «движущаяся жидкость – электромагнитное поле», уместно предположить, что масштабные преобразования затронули, в основном, вторую её часть – электромагнитное поле. В этой связи рассмотрим, как меняется энергия электрического поля, при изменении линейных размеров в n раз. Пусть ω – плотность энергии электрического поля, а L_1 и L_2 –

характерные линейные размеры систем. Тогда для первой и второй (уменьшенной) системы выражения для электрической энергии можно представить в виде [5]:

$$W_1 = \omega_1 V_1 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E_1^2 L_1^3 \quad (1)$$

$$W_2 = \omega_2 V_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E_2^2 L_2^3,$$

где V_1 и V_2 – объём первой и второй системы соответственно. Если заряд (потенциал) останется постоянным, то:

$$E_1 L_1^2 = E_2 L_2^2 \quad (2)$$

и тогда можно записать:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{E_2^2 L_2^3}{E_1^2 L_1^3} = \frac{L_1^4 L_2^3}{L_2^4 L_1^3} = \frac{L_1}{L_2}$$

Поскольку $\frac{L_1}{L_2} = n$, то

$$W_2 = n W_1 \quad (3)$$

и тем самым энергия электрического поля изменилась в n раз. В случае, когда $n=2$ энергия электрического поля возрастает в 2 раза, что хорошо видно на рисунке 6, на котором показано распределение напряжённости электрического поля E в выходном сечении канала для исходной геометрии и геометрии уменьшенной в 2 раза.

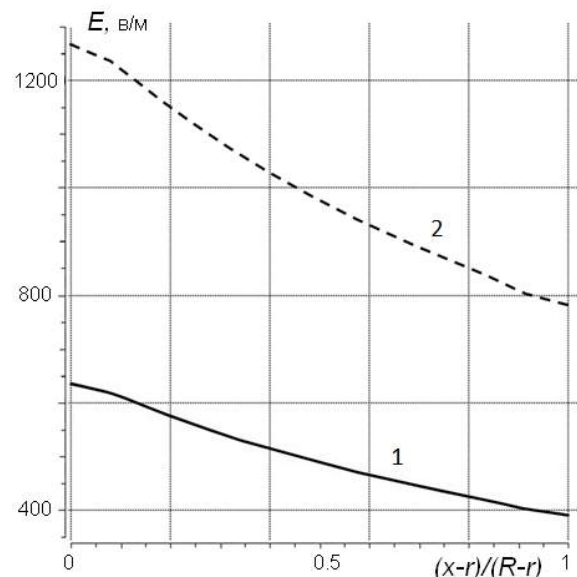


Рис. 6 Распределение напряжённости электрического поля в выходном сечении канала при изменении линейных размеров

Хорошо видно, что распределения напряжённости электрического поля подобны и отличаются друг от друга в 2 раза, что согласуется с формулой (3).

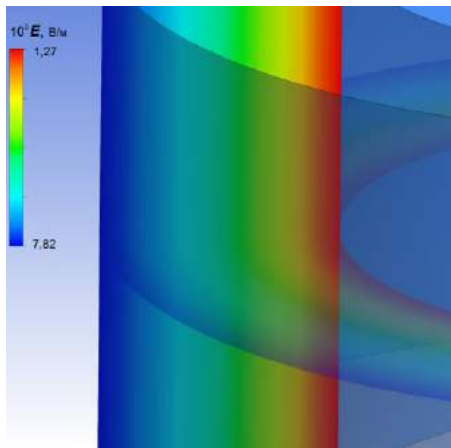


Рис. 7 Распределение напряженности электрического поля

На рисунке 7 показано распределение напряжённости электрического поля E в вертикальной и горизонтальной плоскостях симметрии канала, линейные размеры которого уменьшены в 2 раза.

Заключение

По результатам работы можно сделать вывод о существенной роли (при прочих равных условиях) масштабного фактора, при взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей.

Литература

1. Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д. Магнитные поля в астрофизике. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 384 с.
2. Брагинский С.И. К магнитной гидродинамике слабо проводящих жидкостей // ЖЭТФ. 1959. Т.37, вып.5(11). С.1417–1430.
3. Эльзассер В.М. Магнитная гидродинамика // УФН. 1958. Т.LXIV, вып.3. С.530 – 586.
4. Кирко И.М., Кирко Г.Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. – М.– Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2009. 632 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. – 11-е изд., исп. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
6. Маламанов С.Ю. Численное моделирование задач о силовом взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей // Математическое моделирование. 2015 год. Том 27. №11. С. 56–62.

References

1. Zel'dovich YA. B., Ruzmaykin A. A., Sokolov D. D. Magnitnyye polya v astrofizike [Magnetic fields in astrophysics]. M.; Izhevsk: NITS «Regu-lyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2006. 384 s.
2. Braginsky S.I. K magnitnoy gidrodinamike slabo provodyashchikh zhidkostey [On magnetohydrodynamics of weakly conducting liquids] // ZHETF. 1959. T.37, vyp.5(11). S.1417–1430.
3. El'zasser V.M. Magnitnaya gidrodinamika [Magnetohydrodynamics] // UFN. 1958. T.LXIV, vyp.3. – S.530 – 586.
4. Kirko I.M., Kirko G.Ye. Magnitnaya gidrodinamika. Sovremennoye videniye problem [Magnetic hydrodynamics. Modern vision of problems]. – M.– Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Izhevskiy institut komp'yuternykh.
5. Tamm I.Ye. Osnovy teorii elektrichestva: Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Fundamentals of the theory of electricity: Textbook for universities], 11-ye izd., isp. i dop. – M.: FIZ-MATLIT, 2003. 616 s
6. Malamanov S.YU. Chislennoye modelirovaniye zadach o silovom vzaimodeystvii gidrodinamicheskogo i elektromagnitnogo poley [Numerical modeling of problems on the force interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields] // Matematicheskoye modelirovaniye. 2015 god. Tom 27. №11. S. 56–62

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степан Юрьевич Маламанов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Механика деформируемого твёрдого тела», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова. 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Stepan Y. Malamanov, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor of the Department of “Mechanics of a deformable solid”, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova. 190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., 1 e-mail: stevmal@mail.ru

Валерий Алексеевич Павловский, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизические основы судовой энергетики». Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Valery A. Pavlovsky, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Professor of the Department of Thermophysical Basics of Ship Energy. St. Petersburg State Marine Technical University. 190008, St. Petersburg, ul. Pilot, 3. e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.04.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.04.2022.
Принята к публикации/accepted for publication 29.04.2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 004.9:338:504.75

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.052>

Метод инженерного прогнозирования в формировании управленческих решений с помощью компьютерных технологий для судостроения

Е.А. Чихонадских¹ hel60@mail.ru, Е.В. Песоцкая² epes@mail.ru, Г.В. Черкаев¹ gcherkaev@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет

Аннотация. Использование компьютерных технологий в период дистанционного обучения привели к необходимости расчета природных ресурсов разными способами. Включение природных ресурсов в систему экономических отношений является очень сложной задачей, так как они не созданы человеком, а даны ему природой. Однако в результате хозяйственной деятельности человек вынужден постоянно сталкиваться с использованием природных ресурсов, поэтому возникает необходимость в их экономической оценке. В статье рассмотрен один из основных методов оценки, выбранных для такой задачи – метод инженерного прогнозирования. Использование данного метода позволяет достичь универсальности в процессе формирования управленческих решений, связанных с природопользованием, технология которого предусматривает применение современных компьютерных систем.

Предлагается алгоритм, позволяющий применять метод инженерного прогнозирования, адаптированный к специфике задач природопользования, в управленческой практике. Даются рекомендации по его инструментальному сопровождению.

Ключевые слова: компьютерные технологии, природные ресурсы, управление природопользованием, инженерное прогнозирование, судостроение, готовность платить.

Для цитирования Чихонадских Е.А., Песоцкая Е.В., Черкаев Г.В. Метод инженерного прогнозирования в формировании управленческих решений с помощью компьютерных технологий для судостроения, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 119—124.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.052>

The method of engineering forecasting in the formation of management decisions using computer technologies

Elena A. Chikhonadskikh¹ hel60@mail.ru, Elena V. Pesotskaya² epes@mail.ru,

Georgii V. Cherkaev¹ gcherkaev@mail.ru

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

²St. Petersburg State University Of Economics, Russian Federation

Abstract. The use of computer technology during distance learning has led to the need to calculate natural resources in different ways. The inclusion of natural resources in the system of economic relations is a very difficult task, since they are not created by man, but given to him by nature. However, as a result of economic activity, a person is forced to constantly face the use of natural resources, therefore there is a need for their economic assessment. The article considers one of the main evaluation methods chosen for such a task – the method of engineering forecasting. The use of this method makes it possible to achieve universality in the process of forming management decisions related to environmental management, the technology of which provides for the use of modern computer systems.

An algorithm is proposed that allows the use of an engineering forecasting method adapted to the specifics of environmental management tasks in management practice. Recommendations on its instrumental support are given.

Key words: computer technology, natural resources, environmental management, engineering forecasting, shipbuilding, willingness to pay.

For citation: Elena A. Chikhonadskikh, Elena V. Pesotskaya, Georgii V. Cherkaev, The method of engineering forecasting in the formation of management decisions using computer technologies, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 119—124.

С точки зрения экономической теории природа представляет собой систему со сложным распределением права собственности на природные ресурсы, от частного до коллективного, причем ни

один человек не может быть лишен права пользования такими ресурсами.

Развитие экономики, ориентированное только на экономический рост, как известно, ведет к истощению природных ресурсов и неминуемому

экологическому кризису. Экстенсивный экономический рост, обусловленный увеличением количества расходуемых ресурсов, то есть привлечением дополнительных единиц капитала (человеческого, природного или произведенного), изжил себя в современных условиях. Ухудшение экологической ситуации отрицательно сказывается на здоровье населения. Ограниченность запасов природных ископаемых заставляет искать пути их более эффективного использования. Увеличение произведенного капитала, в конечном итоге, также сводится к увеличению затрат человеческого и природного капиталов, так как производство дополнительных единиц основных фондов связано с дополнительными затратами сырья и рабочей силы. Интенсивный экономический рост происходит за счет повышения эффективности использования ресурсов, который, как правило, связан с применением новых прогрессивных технологий. Очевидно, что экстенсивный экономический рост невозможен без увеличения нагрузки на окружающую природную среду и истощения природных ресурсов [1].

При достижении определенного уровня истощения или износа природных ресурсов вводится в действие один из наиболее важных принципов экономического механизма управления природопользованием – платность, который означает использование природных ресурсов в процессе производства исключительно за плату. Ни один природный ресурс – недра, земля, реки, леса и иная растительность, животный мир – не может предоставляться кому бы то ни было в пользование бесплатно. Также плата взимается за загрязнение окружающей природной среды и другие виды вредных воздействий.

Отечественное судостроение, широко ориентированное на производство металлоемких конструкций (буровые платформы, плавучие АЭС, ледоколы и пр.) по-прежнему обладает высоким показателем природоемкости ($e^{ПФ} \approx 11,5$), значительно превосходящим аналогичные показатели зарубежных стран (например, $e^{Корея} \approx 0,10$) [2].

Ко всему прочему, судостроительные предприятия, как правило, занимают большие площади, потребляют большое количество энергоресурсов, что ведет к значительному количеству вредных выбросов в окружающую среду [3].

Решая проблему чрезмерно завышенного потребления природных ресурсов в судостроении, целесообразно пользоваться основными принципами и концепциями, которые широко используются в управлении природопользованием.

Судостроение – крайне наукоемкая отрасль, включающая в себя все без исключения достижения современной науки и техники, поэтому, в первую очередь, необходимо помнить о принципе научности, который подразумевает разумное, основанное на научных исследованиях и последних достижениях науки и техники, сочетание экологических и экономических интересов общества, обеспечивающих реальные гарантии прав человека на здоровую и благоприятную для жизни окружающую среду. Строгая научная обоснованность требуется при совместном

использовании различных составляющих экономического механизма.

Для определения экономической ценности природного ресурса важной является концепция «готовность платить», отражаемая кривой спроса, учитывающая рыночную стоимость определенного экологического блага или ресурса и позволяющая, в некоторой степени, управлять эффективностью природопользования.

Концепцию «готовность платить» можно представить в виде графика (рис. 1).

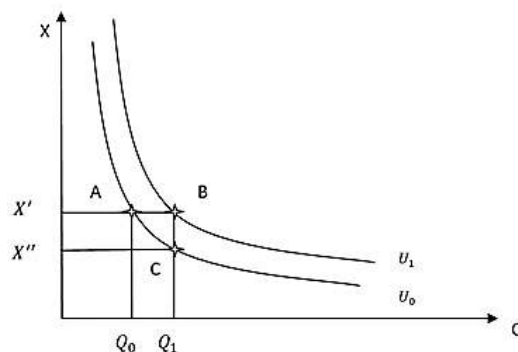


Рис. 1. Графическое представление концепции «готовность платить»

На данном графике проиллюстрированы «кривые безразличия» (кривые U) налогоплательщиков по отношению к изменениям в экологическом состоянии окружающей среды. Где ось X обозначает состояние окружающей среды, а ось Q обозначает состояние окружающей среды. Причем – U является функцией от Q и X .

Предположим, что экологическое состояние окружающей среды улучшилось. Сравним кривые U_0 и U_1 . На графике видно, что налогоплательщик, из точки A переходит в точку B (при условии того, что потребление материальных благ остаётся прежним).

Наибольшее количество материальных благ, от которых налогоплательщик может отказаться для сохранения качества окружающей среды на уровне Q_1 , соответствует такому уровню, при котором он окажется на прежнем уровне полезности U_0 . В данном случае оно равно разнице между X' и X'' отрезку BC .

Современные тенденции в совершенствовании процесса управления различными видами хозяйственной деятельности, связанными с природопользованием, выдвигают на первый план поиск универсальных методов формирования управленческих решений, в том числе с использованием компьютерных технологий.

Источником данного поиска является методический инструментарий экономической аналитики – разнообразный и далеко не полностью используемый в компьютеризации управленческой практики.

Для оценки показателя «готовность платить» может быть с успехом использован один из методов, входящих в состав такого направления экономической аналитики, как инженерное прогнозирование. Суть метода заключается в определении средневзвешенной оценки факторов, детерминирующих величину конкретного показателя

(в данном случае «готовность платить» – ГП), выборе оптимального показателя и разработке рекомендаций, обеспечивающих проведение мероприятий, направленных на достижение оптимального режима. Метод ГП относится к числу методов, позволяющих разрабатывать обоснованные управленческие решения. Метод ГП входит в состав управленческого инструментария, соответствующего как стратегическим, так и тактическим задачам [3].

Принципиальной особенностью данного метода является его использование в условиях вариативности, когда предполагается, что в распоряжении аналитика существует ряд вариантов, подлежащих сопоставлению. Итогом сопоставления должен стать выбор наилучшего варианта из числа сравниваемых, то есть наиболее рационального. Применительно к показателю ГП речь идет о выборе наиболее рационального варианта, отражающего готовность потребителей к оплате – варианта денежной оценки.

Алгоритм использования метода инженерного прогнозирования может быть представлен в последовательности этапов (рис2).



Рис. 2. Алгоритм использования метода инженерного прогнозирования

Этап I – Разработка сравниваемых вариантов.

Варианты, представляющие собой различные условия оплаты. Они могут быть названы альтернативными, но более точно характеризовать их как сравниваемые, так как альтернативные, как

известно – это противоположные, полярные варианты, что в данном случае не предусматривается.

Число сравниваемых вариантов, в принципе может быть любым, но рекомендуется ограничиваться тремя-четырьмя вариантами, наиболее приемлемыми исходя из логики и сложившейся практики. Формирование вариантов (а также ряд последующих процедур) следует проводить с учетом экспертного метода. При этом необходимо соблюдать все требования, предъявляемые к экспертному методу (методу экспертных оценок) обеспечиваемые корректность получаемых с его помощью результатов.

К числу этих требований относятся:

- однозначность и ясность вопросов, задаваемых экспертам, возможность получения однозначных ответов;
- достаточное число экспертов;
- возможность полного обеспечения независимости суждений.

Самостоятельная аналитическая задача – определение достаточного числа экспертов. Методология инженерного прогнозирования предполагает, что в максимизации количества привлекаемых экспертов нет необходимости. Более того 20-30 независимых экспертов способны решить задачу любой сложности при условии их достаточной компетентности в отношении рассматриваемой проблематики [4]. Следует отметить, что на практике обеспечить соблюдение данного условия весьма затруднительно. Зачастую необходимо количество компетентных специалистов, способных выступить в качестве экспертов, не обнаруживается или просто отсутствует. В этом случае аналитик вынужден ограничивать число привлекаемых экспертов, что можно рассматривать, как допустимую меру, имея ввиду, что она не может не сказаться на точности получаемых результатов.

Этап II – Формирование системы факторов, влияющих на готовность потребителей к оплате.

ГП детерминируется многими факторами, например, такими, как уровень платежеспособности потребителей, ценность объекта окружающей среды, значимость потребности, удовлетворяемой этим объектом или ресурсом, в сложившейся структуре потребления и так далее.

Факторы определяются на основе качественного анализа. Данный анализ может быть проведен индивидуально, конкретным аналитиком, а также может стать результатом работы исследовательской группы различного численного состава. Главное условие на этом этапе – обеспечение глубины качественного анализа, что достигается привлечением обширной статистической и аналитической информации, научной литературы, результатов прикладных исследований, разработок известных специалистов- признанных авторитетов в исследуемой области.

Этап III – Формирование системы показателей, отражающих влияние каждого из факторов.

Для каждого из факторов, обуславливающих ГП, определяется наиболее точно отразить его (фактора) динамику. При этом опираются на понимание разницы между терминами «показатель» и «параметр». Каждый из них представляет собой определенную форму

информационного высказывания об объекте (факторах, отражающих ГП). Однако «параметр» может быть выражен как количественно, так и качественно, а «показатель» – это всегда количественная форма информационного высказывания. Специфика метода инженерного прогнозирования заключается в применении только количественных оценок, причем выраженных в натуральных единицах измерения. Ряд факторов не может быть охарактеризован четко выраженными количественными показателями, они описываются качественными параметрами. В этом случае следует применять балльные оценки, которые могут быть получены с помощью экспериментального метода с использованием всех предъявляемых к нему требований. Шкала, применяемая в процедуре балльного оценивания, может быть любой.

Оценка качественных параметров в баллах позволяет перевести их в форму показателей (безразмерных), которые вместе с показателями, выраженными в натуральных единицах измерения, образуют необходимый массив информационных материалов. Такие показатели являются частными показателями ГП.

Этап IV – Ранжирование факторов и показателей по степени значимости.

Факторы, а вместе с ними и характеризующие их показатели, оцениваются по степени их влияния на ГП, то есть по степени значимости. Итогом такой оценки является формирование ранжированной последовательности частных показателей ГП – $K^{ГП}_i$, где i – место показателя в этой последовательности.

При проведении процедуры ранжирования необходимо учитывать следующее:

- оно осуществляется на основе экспертного метода по научно- и методически обусловленного алгоритма;

- оно предполагает «движение» по направлению от наиболее значимого показателя к наименее значимым показателям, (на первом месте наиболее значимый показатель).

Этап V – Систематизация частных показателей ГП.

Процедура формирования ранжирования и количественной оценки частных показателей ГП проводится по каждому из сравниваемых вариантов. По ее результатам необходимо зафиксировать системное выражение ранжирования и по значимости частных показателей ГП, придав ему табличную форму (табл. 1).

Таблица 1

Ранжирование и количественная оценка частных показателей ГП

№	Сравниваемые варианты j		I вар.	II вар.	III вар.
	Частные показ. ГП _i				
1					
2					
3					
4					
⋮					
⋮					
n					

Этап VI – Выбор варианта-эталона.

Один из сравниваемых вариантов следует принять за эталон. Соответственно и отраженные в нем частные показатели ГП необходимо фиксировать, как эталонные.

В качестве эталона может быть выбран любой из сравниваемых вариантов, т.к. эталон в данном случае – не образец, не лучший из вариантов, а база для сравнения.

Этап VII – Принятие частных показателей, соответствующих варианту-эталону за единицу.

Так как вариант-эталон есть база для сравнения частных показателей ГП между собой, необходимо принять за единицу их количественное выражение в эталоне. В итоге – каждый из частных показателей $K^{ГП}_i$ по варианту эталону становится 1, и необходимо частные показатели по другим вариантам выразить в отношении к единице.

Этап VIII – Определение частных индексов ГП.

Частные показатели ГП (в натуральных единицах измерения или баллах) сопоставляются аналогичными показателями по варианту-эталону, т.е. с единицей. В результате такого сопоставления получаются частные индексы ГП, множество которых представлено в каждом из сравниваемых вариантов – $J^{ГП}_i$.

Данная процедура позволяет методически «исключить» размерность частных показателей, перевести их в безразмерную форму, позволяющую производить различные математические действия.

Этап IX – Определение интегрального показателя индекса ГП по каждому из сравниваемых вариантов.

По каждому из сравниваемых вариантов вычисляется интегральный индекс ГП. Для этого используется выражение (1):

$$J^{ГП}_H = \sum \varphi_i * J^{ГП}_i / \sum \varphi_i \quad (1)$$

где: $J^{ГП}_i$ – частный индекс i -го показателя ГП, i – номер этого показателя в последовательности, ранжированной по степени значимости.

φ_i – коэффициент весомости, отражающий позиции (линейность i -го показателя в последовательности, ранжированной по степени значимости).

Коэффициент φ_i , исходя из методологии инженерного прогнозирования, рассчитывается по формуле (2):

$$\varphi_i = i / 2^{(i-1)} \quad (2)$$

Анализируя методологический прием, используемый для определения коэффициента φ_i индексов, нетрудно заметить, что для показателей и индексов, размещенных в ранжированной последовательности на первом и втором месте, данный коэффициент равен 1, а далее происходит последовательное уменьшение его величины. Это значит, что если в последовательности наличествует, лишь два частных показателя (индекса) можно оперировать среднестатистическим. Но иные частные показатели должны включаться в интегральный индекс с учетом снижения их значимости, определяемого алгоритмом инженерного программирования.

Следует обратить внимание на следующую особенность данного алгоритма – значение

коэффициента выполнимости при «движении» от первого к последнему показателю (индексу) в ранжированной потребности происходит неравномерно. Сколь-нибудь существенную величину имеют лишь коэффициенты, отражающие несколько позиций, находящиеся в начале ранжированной последовательности (от первой до шестой позиции). Для более отдаленных позиций коэффициент ϕ_i становится малой величиной, что обусловлено низкой, незначительной значимостью показателя (индекса), оцениваемого с его помощью. Это означает, что на практике целесообразно ограничиваться шестью частными показателями (индексами) ГП или подвергнуть всю систему показателей группировке и оперировать логически сформированными группами, с пониманием того, что и внутри группы можно, при необходимости, провести аналогичные аналитические процедуры.

Этап X – Сравнение интегральных индексов ГП по каждому варианту.

Интегральный индекс по варианту-эталоноу в результате производимых действий, как и частный индекс, получит значение 1. Интегральные индексы по другим вариантам из числа сравниваемых оцениваются, как отношение к единице и выбирается вариант с наибольшим индексом.

Этот вариант характеризуется, как наиболее рациональный, то есть лучший из имеющихся в распоряжении аналитика.

Этап XI – Структурный анализ интегральных индексов ГП и разработка рекомендаций по корректировке условий оплаты.

Полученные в ходе сравнения вариантов ГП итоговые результаты следует подвергнуть структурному анализу.

Важно определить:

- какие из факторов наиболее активно повлияли на достижение наиболее рационального результата;
- какие из факторов привели к снижению итогового результата;
- как повлияла значимость факторов;
- достаточное ли количество факторов было учтено и т.д.

По итогам структурного анализа необходимо разработать конкретные рекомендации, способные обеспечить практическую реализуемость и эффективность по наиболее рациональному варианту, а также по тем вариантам, которые пока не соответствуют рациональности и обладают определенным потенциалом.

При этом следует ориентировать на следующие управленческие принципы:

- развивать выявленные преимущества;
- объективно оценивать выявленные недостатки;
- изыскивать возможности для компенсации недостатков;
- оказывать влияние на систему факторов, обуславливающих ГП с использованием методов прямого и косвенного воздействия.

Литература

1. Экономика природопользования как научная дисциплина [Электронный ресурс]: официальный сайт. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/3524/766/lecture/30300>.
2. Чихонадских Е.А., Черкаев Г.В., Цыгельнюк Е.Ю., Митрофанова Т.Н. Управление природопользованием: учебное пособие / под ред. Г.В. Черкаева – СПб.: СПб.: ИЦ СПбГМТУ, 2013, - 204 с.
3. Чихонадских Е.А., Карышев И.В., Спивак Д.А. Экономическая оценка природных ресурсов в судостроении. // Морской вестник, 2010. № 1. – С 110-111.
4. Песоцкая Е.В., Русецкая О.В., Трофимова Л.А., Трофимов В.В. Менеджмент: учебник для бакалавров /под ред. А. Н. Петрова. 2-е изд. испр. и доп. – Москва: изд-во Юрайт, 2014 – 645 с.
5. Формирование конкурентных преимуществ предпринимательских структур. – Горбунов А.А., Песоцкая Е.В., Хакимов А.Х. – «Журнал правовых и экономических исследований». 2018. №4 С.125-133
6. Методологические аспекты управления конкурентоспособностью промышленных предприятий в условиях современной экономики. – Песоцкая Е.В., Селютина Л.Г., Бородунова В.В. – «Kant». 2020. №4(37) С. 191-195
7. Берг ван ден, Г. Ключевые модели менеджмента. 77 моделей, которые должен знать каждый менеджер / Г.ван ден Берг, П.Питерсма; пер. с англ. В.Н. Егорова; агентство «Berennschot». – 6-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2019. – 400 с.
8. Клейтнер Г.Б. Стратегия предприятия. – М.: Дело. 2008
9. Тарануха Ю.В. Конкуренция: система и процесс. Ю.В.Тарануха. – М.: Дело и сервис, 2012. – 665 с.
10. Альтшуллер Г. Найти идею: введение в ТРИЗ -теорию решения изобретательских задач. – М.: Альпина Паблишерз, 2011. – 399 с.

References

1. Ekonomika prirodopol'zovaniya kak nauchnaya disciplina [Environmental economics as a scientific discipline] [Elektronnyj resurs]: oficial'nyj sajt. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/3524/766/lecture/30300>.
2. Chihonadskih E.A, Chherkaev G.V., Cygel'nyuk E.YU., Mitrofanova T.N. Upravlenie prirodopol'zovaniem: uchebnoe posobie [Environmental Management: a study guide] / pod red. G.V. Chherkaeva – SPb.: SPb.: IC SPbGMTU, 2013, - 204 s..
3. Chihonadskih E.A, Karyshev I.V., Spivak D.A. Ekonomicheskaya ocenka prirodnyh resursov v sudostroenii [Economic assessment of natural resources in shipbuilding]. // Morskoj vestnik, 2010. № 1. – S 110-111.
4. Pesockaya E.V., Ruseckaya O.V., Trofimova L.A., Trofimov V.V. Menedzhment: uchebnik dlya bakalavrov [Management: textbook for bachelors] /pod red. A. N. Petrova. 2-e izd. ispr. i dop. – Moskva: izd-vo YUrajt, 2014 – 645 s.

5. Formation of competitive advantages of entrepreneurial structures. – Gorbunov A.A., Pesotskaya E.V., Khakimov A.H. – "Journal of Legal and Economic Research". 2018. Number. 4 pages 125-133.
6. Methodological aspects of managing the competitiveness of industrial enterprises in the modern economy. – Pesotskaya E.V., Selyutina L.G., Borodunova V.V. – "Kant". 2020. Number. 4(37) pages 191-195.
7. Key management models. 77 models that every manager should know / G.van den Berg, P. Petersma; russian version translated from the English by V.N. Egorov; p.h. "Berennschot". - 6th ed.: Laboratory of Knowledge, 2019. – 400 pages.
8. Enterprise strategy., Kleiner G.B. – p.h. «Delo». 2008
9. Competition: system and process. Yu.V.Taranukha, p.h. "Business and Service", 2012. – 665 pages.
10. To find an idea: an introduction to the TIPS: theory of solving inventive problems, Altshuller G, p.h. "Alpina Publishers", 2011. – 399 pages.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Елена Александровна Чихонадских, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Экологии промышленных зон и акваторий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190121, Санкт-Петербург, ул.Лоцманская, 3, e-mail: hel60@mail.ru

Елена Владимировна Песоцкая, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры Экономики и управления в сфере услуг, Санкт-Петербургский государственный экономический университет. 191023, Санкт-Петербург, ул. Садовая, 21, e-mail: epes@mail.ru

Георгий Владимирович Черкаев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Экологии промышленных зон и акваторий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. 190121, Санкт-Петербург, ул.Лоцманская, 3, e-mail: gcherkaev@mail.ru

Elena A. Chikhonadskikh, Ph.D. (Eng), assistant professor assistant professor of the Department of the ecology of industrial zones and water areas, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: hel60@mail.ru.

Elena V. Pesotskaya, Dr. Sci. (Econ), professor, professor of the Department of Economics and Management in the Service Sector, St. Petersburg State University Of Economics, Sadovaya street, 21, St. Petersburg, 191023, Russian Federation, e-mail: epes@mail.ru

Georgiy V. Cherkaev, Ph.D. (Eng), assistant professor assistant professor of the Department of the ecology of industrial zones and water areas, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: gcherkaev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.01.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.05.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 21.05.2022.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.053>

Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении

В.Ю. Семенова¹ sem_viktoria@mail.ru, Д.А. Альбаев¹ albaevdaniil@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных взаимодействием различных видов колебаний на основании применения трехмерной потенциальной теории. Для их определения необходимо вычисление потенциалов второго порядка малости. Представленное решение в отечественной практике является новым. Решение задачи осуществляется на основании методов малого параметра и интегральных уравнений с учетом нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. В работе расчет интегралов по свободной поверхности проводится напрямую за счет их сходимости на бесконечном удалении от судна. Нелинейные силы и моменты определяются в работе с использованием различных функций Грина: для бесконечно-глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины, когда $H \rightarrow \infty$. Полученные результаты практически полностью согласуются между собой. Приводятся результаты расчетов нелинейных сил и моментов для разных судов. Расчеты представлены в сравнении с расчетами по двумерной теории, выполненными также для случая бесконечно глубокой жидкости и жидкости ограниченной глубины при больших значениях отношения глубины к осадке H/T . Показано хорошее согласование результатов между собой в большинстве случаев. Показана возможность расчета нелинейных сил, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки на произвольных курсовых углах.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, потенциал второго порядка, функция Грина, нелинейные силы, взаимодействие колебаний, численные методы.

Для цитирования: Семенова В.Ю., Альбаев Д.А., Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 2. С. 125—132.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.053>

Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves

Viktoriya Yu. Semenova¹ sem_viktoria@mail.ru, Danil A. Al'baev¹ albaevdaniil@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article considers the definition of nonlinear second-order forces caused by the interaction of various types of motions based on the application of three-dimensional potential theory. To determine them, it is necessary to calculate the potentials of the second order of smallness. The presented solution is new in domestic practice. The problem is solved on the basis of small parameter methods and integral equations taking into account the nonlinear boundary condition on the free surface of the liquid. The paper shows the possibility of calculating the integrals over the free surface directly due to their convergence at an infinite distance from the ship. Nonlinear forces and moments are determined in the work using various Green's functions: for an infinitely deep fluid and a fluid of limited depth when $H \rightarrow \infty$. The results obtained are in almost complete agreement with each other. The results of calculations of nonlinear forces and moments for different ships are presented. The calculations are presented in comparison with the calculations according to the two-dimensional theory, performed also for the case of an infinitely deep liquid and a liquid of limited depth at large values of ratio H/T . A good agreement of the results is shown among themselves in most cases. The possibility of calculating nonlinear forces arising from the interaction of certain types of motions at arbitrary course angles is shown.

Keywords: method of the integral equations, three-dimensional potential theory, the potential of the second order, Green's function, nonlinear forces, interaction of motions of ship, numerical methods

For citation: Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev, Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 2. P. 125—132.

Введение

При определении нелинейных сил, действующих на судно в условиях регулярного волнения необходимо учитывать взаимосвязь отдельных

видов колебаний между собой. В нелинейной теории взаимодействие различных видов колебаний учитывается в граничных условиях на свободной поверхности жидкости, на смоченной поверхности судна и в интеграле Лагранжа-Коши для давления и

сводится к определению соответствующих потенциалов второго порядка .

В работах [1], [10], [12] были определены нелинейные силы, обусловленные взаимодействием поперечно-горизонтальной и бортовой качки, поперечно-горизонтальной и вертикальной и вертикальной и бортовой качки на основании двумерной потенциальной теории. Показано , что данные силы могут быть сопоставимы по величине с нелинейными силами, обусловленными взаимодействием колебаний и волнения.

В существующих работах, основанных на использовании трехмерной теории [7],[8], [9], [11] не проводилось отдельное исследование данной категории сил.

В работах авторов было последовательно рассмотрено определение различных категорий нелинейных сил, а именно : нелинейных сил, возникающих в случае отдельных видов колебаний [2],[3] ; нелинейных сил, возникающих при дифракции [4] ; нелинейных сил , возникающих при взаимодействии отдельных видов колебаний и дифракции [5] . Настоящая работа посвящена определению нелинейных сил, обусловленных различными видами колебаний между собой, а именно: поперечно-горизонтальной качкой, бортовой и вертикальной.

Описание метода

Рассмотрим определение граничных условий на смоченной и свободной поверхности при взаимодействии отдельных видов колебаний между собой.

Граничное условие на смоченной поверхности в общем виде с учетом метода малого параметра будет иметь вид:

$$\frac{d\Phi_{km}^{(2)}}{dn} = -\frac{i}{2}n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi_k^{(1)} - \frac{i}{2}n(\bar{X}^{(1)} \cdot \nabla)\nabla\Phi_m^{(1)} + \frac{i}{2}(V^{(1)} - \nabla\Phi_k^{(1)})N^{(1)} + \frac{i}{2}(V^{(1)} - \nabla\Phi_m^{(1)})N^{(1)}$$

$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6; m = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$

где

$$\bar{X}^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \xi_g^{(1)} + (\psi_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta_m^{(1)}z - \chi_m^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta_m^{(1)}y - \psi_m^{(1)}x) \end{matrix} \right\};$$

$$N^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \psi^{(1)} \cos(n, z) - \chi^{(1)} \cos(n, y) \\ -\theta^{(1)} \cos(n, z) + \chi^{(1)} \cos(n, x) \\ \theta^{(1)} \cos(n, y) - \psi^{(1)} \cos(n, x) \end{matrix} \right\}$$

$$V^{(1)} = \left\{ \begin{matrix} \xi_g^{(1)} + (\psi^{(1)}z - \chi^{(1)}y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta^{(1)}z - \chi^{(1)}x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta^{(1)}y - \psi^{(1)}x) \end{matrix} \right\};$$

$$n = \left\{ \begin{matrix} \cos(n, x) \\ \cos(n, y) \\ \cos(n, z) \end{matrix} \right\}.$$

Объединенное граничное условие на свободной поверхности можно представить как:

$$Q_{Fkm} = -2\frac{i\omega}{g}(\nabla\Phi_k \cdot \nabla\Phi_m) + \frac{i\omega}{2g}\Phi_k^{(1)}\left(\frac{\partial^2\Phi_k}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_k}{\partial z}\right) +$$

$$+ \frac{i\omega}{2g}\Phi_m\left(\frac{\partial^2\Phi_m}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g}\frac{\partial\Phi_m}{\partial z}\right),$$

Для определения потенциалов $\Phi_{km}^{(2)}$ используется, метод интегральных уравнений, согласно которому:

$$-\frac{1}{2}\Phi_{km}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\Phi_{km}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta)\frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}d\Omega = -\frac{1}{4\pi}\iint_{\Omega}\frac{d\Phi_{km}^{(2)}}{dn}G^{(2)}d\Omega + \frac{1}{4\pi}\iint_{S_F}Q_{Fkm}G^{(2)}dS_F.$$

Полученное уравнение (6) являются интегральными уравнениями Фредгольма второго рода. Для численного решения смоченная и свободная поверхность разбивается на конечное число плоских панелей (рис. 1). Такой подход трансформирует исходное интегральное уравнение в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных потенциалов.

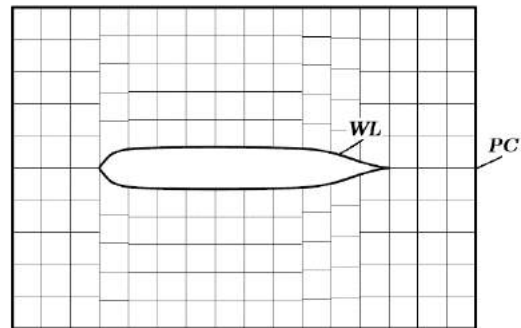


Рис. 2. Разбиение свободной поверхности на панели

Функция Грина $G^{(2)}$ может быть определена по формуле для бесконечно-глубокой жидкости]:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 8v\int_0^{\infty}\frac{e^{k(z+\zeta)}}{k-4v}J_0(kR)dk + i8\pi v e^{4v(z+\zeta)}J_0(4vR).$$

Здесь

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2};$$

$$r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2};$$

$$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2};$$

$$v = \frac{\omega^2}{g} - \text{волновое число.}$$

Или по формуле для жидкости ограниченной глубины [6]:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^{\infty}\frac{2(k+4v)e^{-kh}\cosh k(z+h)}{k\sinh kh - 4v\cosh kh} \cdot \cosh k(\zeta+h)J_0(kR)dk + i2\pi\frac{2((4\mu_0)^2 - (4v)^2)\cosh 4\mu_0(z+h)}{((4\mu_0)^2 - (4v)^2)h + 4v} \cdot \cosh 4\mu_0(\zeta+h)J_0(\mu_0R),$$

где μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид: $\mu_0 \tanh(\mu_0 H) = v$;

J_0 – функция Бесселя.

Остановимся на подробном рассмотрении взаимодействия следующих видов качки: поперечно-

горизонтальной и бортовой ($k = 2, m = 4$); вертикальной и бортовой ($k = 3, m = 4$); поперечно-горизонтальной и вертикальной ($k = 2, m = 3$). Тогда граничные условия (18) с учетом (19) преобразуются в:

-поперечно-горизонтальная и бортовая качка:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{24}^{(2)}}{dn} = & -\frac{i}{2}\eta_g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) + \\ & + \frac{i}{2}\theta z \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\theta y \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \\ & - \frac{i}{2}\dot{\eta}_g \theta \cos(n, z) - \\ & - \frac{i}{2}\theta \left(\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, y) - \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, z) \right); \end{aligned} \quad (24)$$

-вертикальная и бортовая качка:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{34}^{(2)}}{dn} = & -\frac{i}{2}\zeta_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) + \\ & + \frac{i}{2}\theta z \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \frac{i}{2}\theta y \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \\ & - \frac{i}{2}\dot{\zeta}_g \theta \cos(n, y) - \\ & - \frac{i}{2}\theta \left(\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, y) - \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, z) \right); \end{aligned} \quad (25)$$

-поперечно-горизонтальная и вертикальная качка:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{23}^{(2)}}{dn} = & -\frac{i}{2}\zeta_g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right) - \\ & - \frac{i}{2}\eta_g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} \cos(n, y) \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial z} \cos(n, z) \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Основные трудности решения задачи возникают при определении вторых производных, входящих в граничные условия на смоченной и свободной поверхности. Благодаря использованию векторных преобразований, теоремы Стокса и теоремы Гаусса [8], [9] вычисления данных производных можно избежать вообще и получить следующие выражения, входящие в правые части уравнения (6).

Тогда для следующих видов качки будем иметь:

- поперечно-горизонтальная и бортовая качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{24}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, y) - \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} d\Omega + \\ & + \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl + \\ & + \theta \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) - \\ & - \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial n} \left(\frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} y - \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} z \right) d\Omega + \\ & + \theta y \iint_{WL} \left[\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl \end{aligned} \quad (27)$$

-вертикальная и бортовая качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{34}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, z) - \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} d\Omega + \\ & + \zeta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial\Phi_4^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl + \\ & + \theta \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] (y \cos(n, z) - z \cos(n, y)) - \\ & - \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial n} \left(\frac{\partial G^{(2)}}{\partial z} y - \frac{\partial G^{(2)}}{\partial y} z \right) d\Omega + \\ & + \theta y \iint_{WL} \left[\frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial\Phi_3^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl \end{aligned} \quad (28)$$

-поперечно-горизонтальная и вертикальная качка:

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{2} \iint_{\Omega} \frac{d\Phi_{23}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega = \\ & = \zeta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, z) - \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} d\Omega + \\ & + \zeta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial y} s_x - \frac{\partial\Phi_2^{(1)}}{\partial x} s_y \right] G^{(2)} dl + \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 & + \eta_g^{(1)} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \zeta} \right] \cos(n, y) - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial n} \frac{\partial G^{(2)}}{\partial \eta} d\Omega + \\
 & + \eta_g^{(1)} \iint_{WL} \left[\frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial x} s_z - \frac{\partial \Phi_3^{(1)}}{\partial z} s_x \right] G^{(2)} dl
 \end{aligned}$$

Здесь $s_x = n_y / \sqrt{1 - n_z^2}$, $s_y = -n_x / \sqrt{1 - n_z^2}$, $s_z = 0$.

Обход вторых производных на свободной поверхности осуществляется по общей формуле [9]

$$\begin{aligned}
 & \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_k^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F = \\
 & = - \iint_{WL+PC} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_k^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + \\
 & + \iint_{S_F} (\nabla \Phi_k^{(1)} \nabla \Phi_k^{(1)}) G^{(2)} dS_F + \\
 & + \iint_{S_F} \Phi_k^{(1)} (\nabla \Phi_k^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F, \\
 & k = 2, 3, 4.
 \end{aligned} \tag{30}$$

В выражении (30) \iint_{WL+PC} берется по контуру ватерлинии судна и по контуру, ограничивающему

свободную поверхность жидкости на достаточно большом удалении от судна.

Давление второго порядка от дифрагированного волнения определяется уравнением Лагранжа-Коши:

$$\begin{aligned}
 p_{km}^{(2)} = & -\rho \frac{\partial \Phi_{km}^{(2)}}{\partial t} - \\
 & -\rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial y} \right) \right. \\
 & \left. + \left(\frac{\partial \Phi_k^{(1)}}{\partial z} \frac{\partial \Phi_m^{(1)}}{\partial z} \right) \right], \\
 & k = 2, 3, 4; m = 2, 3, 4.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Нелинейные силы и моменты могут быть получены прямым интегрированием давления по смоченной поверхности.

Анализ результатов

На основании изложенного были разработаны программы, реализующие определение нелинейных сил и моментов, обусловленных взаимодействием отдельных видов колебаний судна с использованием функции Грина бесконечной и ограниченной глубины (8) при $H/T \rightarrow \infty$.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для пяти различных типов судов при курсовом угле $\beta = 90$. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Танкер "Баскунчак"	74	12	4.65	0.71	0.8
Балкер "Капитан Панфилов"	134	20.6	9.4	0.78	0.88
Лесовоз "Николай Новиков"	140	21	8.68	0.74	0.83
Сухогруз "Новгород"	138	20.6	9	0.68	0.79
Танкер	310	47.2	18.9	0.85	0.9

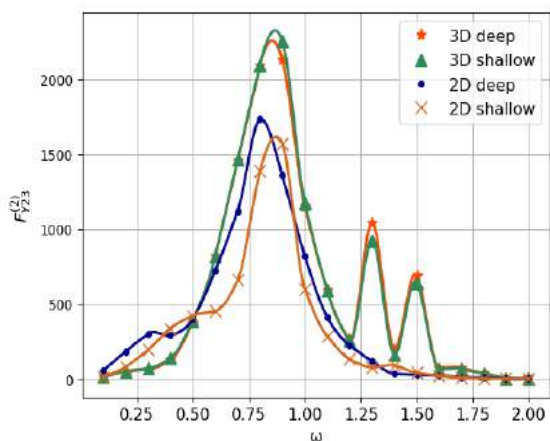


Рис. 3. Сравнение $F_{Y23}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород"

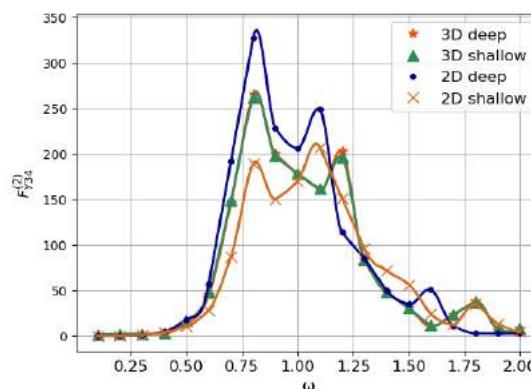


Рис. 3. Сравнение $F_{Y34}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

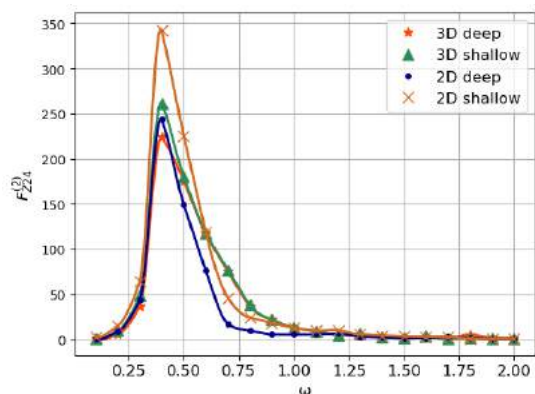


Рис. 4. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород"

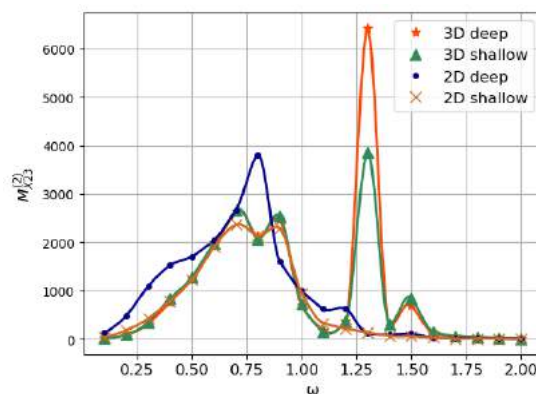


Рис.8. Сравнение $M_{X23}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

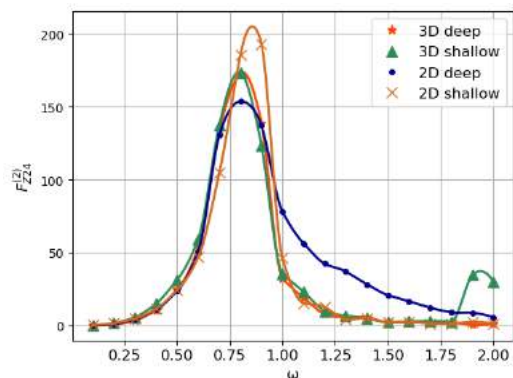


Рис. 5. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак"

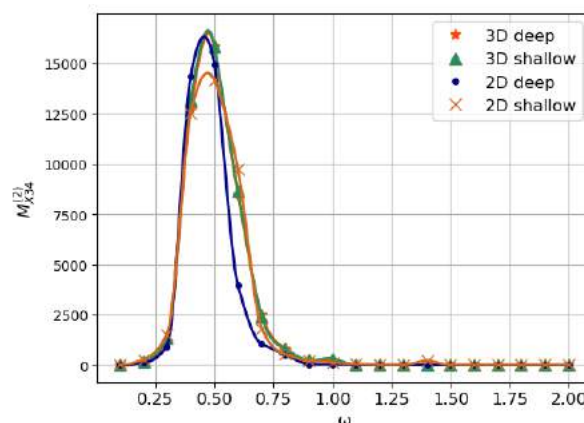


Рис.9. Сравнение $M_{X34}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов"

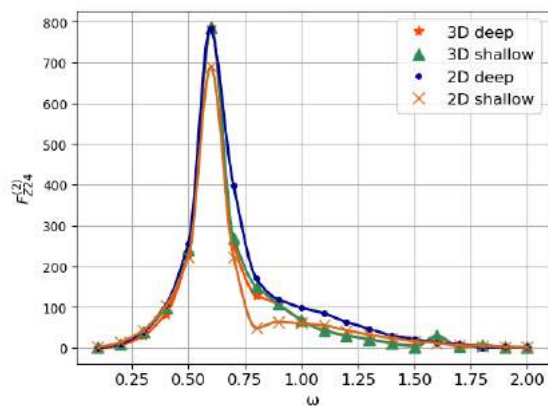


Рис. 6. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"

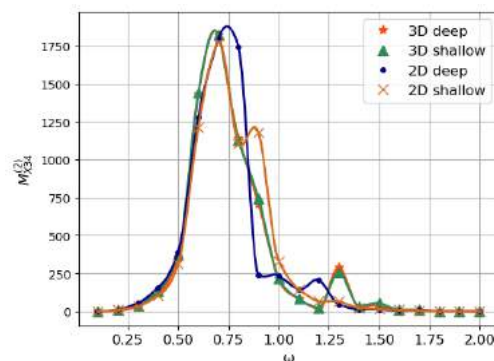


Рис. 10. Сравнение $M_{X34}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"

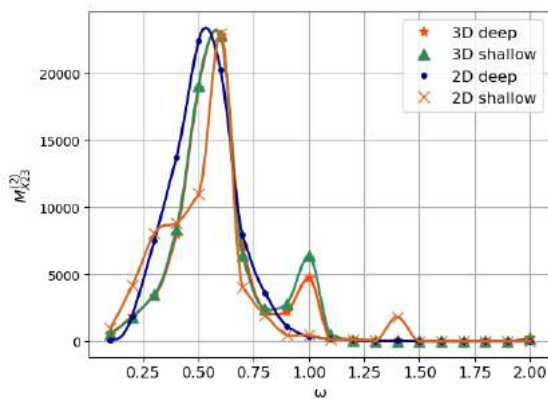


Рис. 7. Сравнение $M_{X23}^{(2)}$ для танкера

На рис.2-10 приведены сравнения расчетов нелинейных сил и моментов, возникающих при взаимодействии поперечно-горизонтальной, бортовой и вертикальной качки между собой с аналогичными расчетами, выполненными с использованием программ, разработанных на основании двумерных методов.

Сопоставление результатов между собой показало, что расчеты, выполненные по трехмерным методам с использованием разных функций Грина, полностью совпадают между собой.

Расчеты нелинейных сил и моментов для различных типов судов достаточно хорошо

согласуются с двумерными методами, особенно нелинейные силы и моменты, обусловленные взаимодействием поперечно-горизонтальной качки и бортовой $F_{Z24}^{(2)}$ и вертикальной и бортовой $F_{Y34}^{(2)}$, $M_{X34}^{(2)}$ (рис.6,9,10). Несколько хуже, в ряде случаев, совпадают расчеты по разным методам нелинейных сил и моментов, возникающих при взаимодействии вертикальной и поперечно-горизонтальной качки. Так, например, нелинейные горизонтальные силы $F_{Y23}^{(2)}$ для сухогруза «Новгород», полученные по двумерным методам несколько меньше значений сил, полученных на основании программы с использованием трехмерного метода решения, что может быть связано с погрешностями использования гипотезы плоских сечений (рис.2).

Нелинейные силы и моменты, обусловленные взаимодействием различных видов колебаний, имеют максимальные значения в зонах резонансов вертикальной и бортовой качки соответственно. Так, можно видеть, что для сухогруза «Новгород» максимальное значение нелинейной вертикальной силы $F_{Z24}^{(2)}$, обусловленной взаимодействием поперечно-горизонтальной и бортовой качки, имеет место на частоте регулярного волнения $\omega=0.37$ (рис.4), для лесовоза «Николай Новиков» на частоте $\omega=0.62$ (рис.6). Указанные частоты соответствуют значениям собственных частот бортовой качки данных судов. Максимальное значение нелинейной горизонтальной силы $F_{Y23}^{(2)}$, обусловленной взаимодействием вертикальной и поперечно-горизонтальной качки, для сухогруза «Новгород» имеет место на частоте $\omega=0.82$ (рис.2), а максимальное значение момента $M_{X23}^{(2)}$ для балкера «Капитан Панфилов» на частоте $\omega=0.75$ (рис.8), что соответствует значениям собственных частот вертикальной качки.

В зоне частот $\omega > 1$ все нелинейные силы и моменты стремятся к нулю из-за резкого уменьшения соответствующих амплитуд качки (рис.2-10). Таким образом, наибольший практический интерес представляет расчет данных сил в области частот $\omega < 1$.

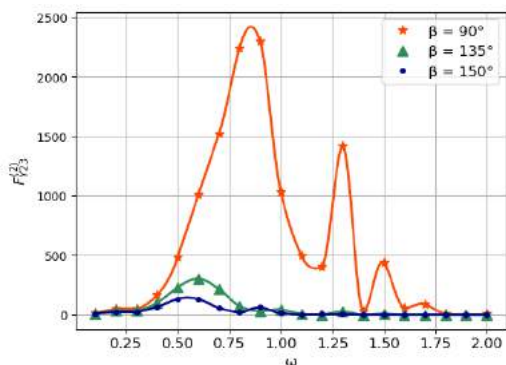


Рис. 11. Сравнение $F_{Y23}^{(2)}$ для лесовоза «Николай Новиков» при различных курсовых углах

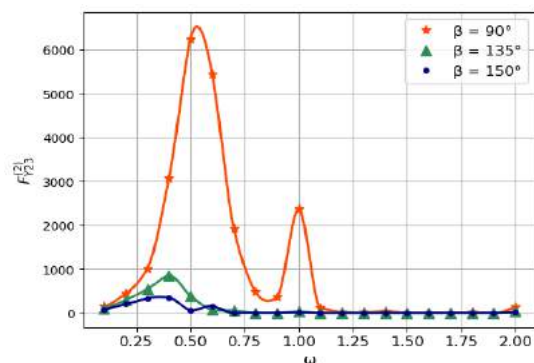


Рис. 12. Сравнение $F_{Y23}^{(2)}$ для танкера при различных курсовых углах

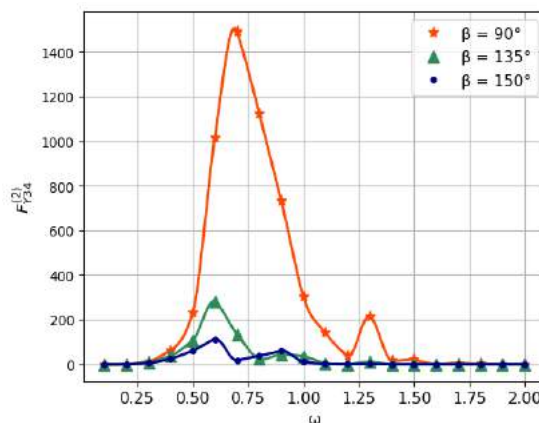


Рис. 13. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для лесовоза «Николай Новиков» при различных курсовых углах

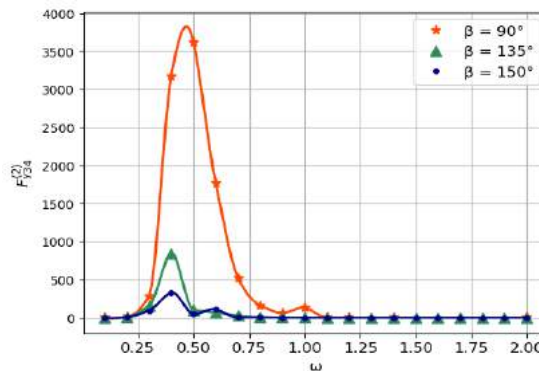


Рис. 14. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для танкера при различных курсовых углах

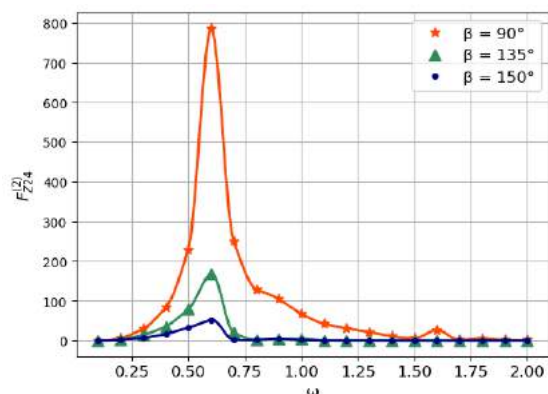


Рис. 15. Сравнение $F_{Z24}^{(2)}$ для лесовоза «Николай Новиков» при различных курсовых углах

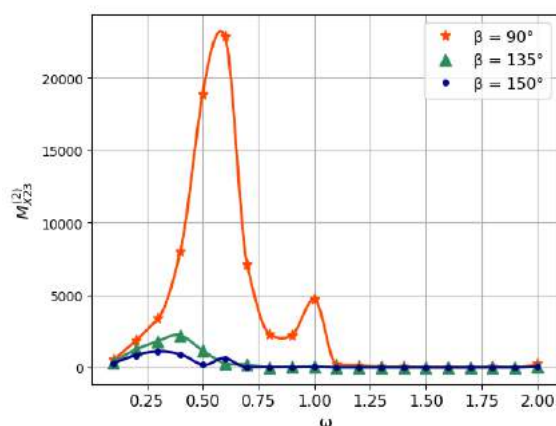


Рис. 16. Сравнение $M_{X23}^{(2)}$ для танкера при различных курсовых углах

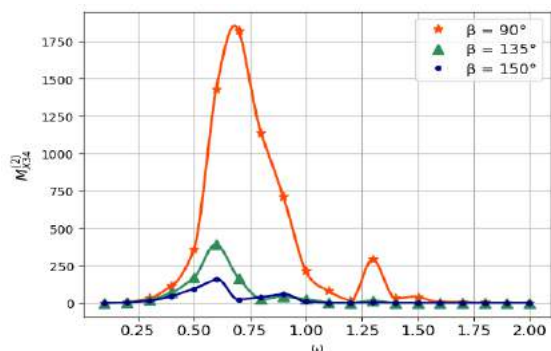


Рис. 17. Сравнение $M_{X34}^{(2)}$ для лесовоза «Николай Новиков» при различных курсовых углах

На рис.11-17 приведены результаты расчетов всех рассмотренных ранее нелинейных сил при различных курсовых углах. Расчеты проводились для трех курсовых углов : 90,135 и 150 градусов. Анализ приведенных результатов показывает, что все нелинейные силы и моменты имеют наибольшие значения при расположении судна лагом. При этом их значения многократно превосходят аналогичные значения на других курсовых углах. Так, нелинейная горизонтальная сила $F_{Y34}^{(2)}$, обусловленная взаимодействием вертикальной и бортовой качки танкера на частоте $\omega=0.37$ и $\beta=90$ в 3.5 раза больше соответствующей силы при $\beta=135$ (рис.14). Нелинейная вертикальная сила $F_{Z24}^{(2)}$, обусловленная взаимодействием поперечно-горизонтальной и бортовой качки лесовоза «Николай Новиков» на частоте $\omega=0.64$ в 4 раза больше аналогичной силы при курсовом угле 135 градусов и в 8 раз больше силы $F_{Z24}^{(2)}$ при курсовом угле 150 градусов (рис.15). Для момента $M_{X23}^{(2)}$, обусловленного взаимодействием вертикальной и поперечно-горизонтальной качки наблюдается двадцатикратное увеличение значений при расположении танкера лагом (рис.16).

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии бортовой и поперечно-горизонтальной качки в образовании нелинейных сил и моментов $F_{Y34}^{(2)}$, $M_{X34}^{(2)}$, $F_{Z24}^{(2)}$, $F_{Y23}^{(2)}$, $M_{X23}^{(2)}$, зависящих от их амплитуд. Уменьшение амплитуд данных видов колебаний на курсовых углах, отличных от 90 градусов, приводит к резкому снижению значений нелинейных сил.

Заключение

В статье рассмотрен метод определения нелинейных сил, обусловленных взаимодействием различных видов колебаний судна на основании трехмерной потенциальной теории и метода интегральных уравнений. В отличие от двумерной теории, разработанные программы позволяют точно определять нелинейные силы на различных курсовых углах.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы в оценке суммарного нелинейного воздействия на судно, составлении дифференциальных уравнений нелинейной качки и определении соответствующих амплитуд колебаний.

Литература

1. Семенова В. Ю. (2005) Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ.
2. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2019) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 4-1 (40). С. 63-69.
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 2-2 (48). С. 11-18.
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, N2, т3. С.20-28

5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, т.2. С. 21-31.
6. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
7. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
8. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
9. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
10. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13th Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331
11. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, c.165-185.
12. Potash R.L. Second-order theory on oscillating cylinders. J.S.R.,1971,v.15,N.4

References

1. Semenova V. Ju. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelinejnoj kachki sudov [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //Diss. na soisk. uch. stepeni d. t. n. Biblioteka SPbGMTU.
2. Semenova V.YU., Al'baev D.A. (2019) Opredelenie nelinejnyh sil vtorogo poryadka, voznikayushchih pri vertikal'noj kachke sudna, na osnovanii trekhmernoj potencial'noj teorii. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory], № 4-1 (40). S. 63-69.
3. Semenova V.YU., Al'baev D.A. (2020) Opredelenie nelinejnyh sil vtorogo poryadka, voznikayushchih pri poperechno-gorizontalnyh i bortovyh kolebaniyah sudov na osnovanii trekhmernoj potencial'noj teorii [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory]., № 2-2 (48). S. 11-18
4. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2021) Opredelenie nelinejnykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystvuyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoj teorii. . Morskie intellektual'nye tekhnologii, N2, t3. S.20-28
5. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2021) Opredelenie nelinejnykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 4, t.2. S. 21-31
6. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014
7. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
8. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
9. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
10. Papanikolaou A., Nowacki H. (1980) Second-order theory of oscillating cylinders in a regular steep wave. Proc.of the 13th Symp.on Naval Hydrodynamics, Tokyo, pp.303-331.
11. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, c.165-185.
12. Potash R.L. Second-order theory on oscillating cylinders. J.S.R.,1971,v.15,N.4

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.03.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 25.03.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 04.04.2022.

Научная статья

УДК 536.2.02

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.054>

Степенное обобщение формулы теплопроводности Фурье и вытекающие из него варианты для записи уравнения энергии

В.А. Павловский¹ v.a.pavlovsky@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В настоящее время при решении задач тепло-массообмена используются линейные определяющие уравнения – в теплопередаче согласно закону теплопроводности Фурье плотность теплового потока линейно связана с градиентом температуры. Такие определяющее уравнение нашло широкое применение для описания процессов тепло – массопереноса при ламинарном режиме течения. Для турбулентных течений эти уравнения непригодны, приходится вводить в рассмотрение эмпирический турбулентный коэффициент теплопроводности λ_t . Однако для описания турбулентных течений возможно пойти и другим путём - модифицировать линейное определяющее соотношения Фурье за счёт придания ему нелинейного степенного вида. В данной работе выполнено двухпараметрическое степенное обобщение формулы теплопроводности Фурье для плотности теплового потока, которое в зависимости от значения показателя степени в этом определяющем соотношении для течений жидкости приводит к различному описанию тепловых процессов. Предлагаемое уравнение энергии турбулентного режима движения жидкости может быть полезно, по крайней мере, для получения предварительных, оценочных характеристик перед началом численного моделирования с использованием современных пакетов прикладных программ.

Ключевые слова: гидродинамика, теплопередача, плотность теплового потока, степенные формулы, обобщение формулы Фурье, дифференциальное уравнение энергии, число Нуссельта.

Финансирование. Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075–03–2020–094/1 от 10.06.2020.

Для цитирования: Павловский В.А. Степенное обобщение формулы теплопроводности Фурье и вытекающие из него варианты для записи уравнения энергии. 2022. № 2 часть 2. С. 133—138.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.054>

A power-law generalization of the Fourier thermal conductivity formula and the resulting variants for writing the energy equation.

Valery A. Pavlovsky¹ v.a.pavlovsky@gmail.com

¹St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. Currently, when solving problems of heat and mass transfer, linear constitutive equations are used - in heat transfer, according to the Fourier heat conduction law, the heat flux density is linearly related to the temperature gradient. Such a constitutive equation has found wide application for describing the processes of heat and mass transfer in a laminar flow regime. For turbulent flows, these equations are unsuitable; one must introduce into consideration the empirical turbulent thermal conductivity coefficient λ_t . However, to describe turbulent flows, it is possible to go in another way - to modify the linear Fourier constitutive relation by giving it a nonlinear power-law form. In this paper, a two-parameter power-law generalization of the Fourier thermal conductivity formula for the heat flux density is performed, which, depending on the value of the exponent in this constitutive relation for fluid flows, leads to a different description of thermal processes. The proposed equation for the energy of the turbulent regime of fluid motion can be useful, at least for obtaining preliminary, estimated characteristics before starting numerical simulation using modern software packages.

Keywords: hydrodynamics, heat transfer, heat flux density, power formulas, generalization of the Fourier formula, differential energy equation, Nusselt number.

Financial Support: This study was carried out within the framework of the state assignment for the implementation of research works No. 075-03-2020-094/1 dated 10.06.2020.

For citation: Valery A. Pavlovsky. A power-law generalization of the Fourier thermal conductivity formula and the resulting variants for writing the energy equation. 2022. № 2 part 2. P. 133—138.

Введение

В настоящее время при решении задач теплообмена используются линейные определяющие уравнения- в гидродинамике тензор напряжений пропорционален тензору скоростей деформаций (реологическое соотношение Ньютона), в теплопередаче плотность теплового потока линейно связана с градиентом температуры (закон

теплопроводности Фурье). При записи этих линейных определяющих уравнений используются коэффициенты пропорциональности, которые носят название коэффициентов вязкости и теплопроводности, соответственно. По закону теплопроводности Фурье [1-3] вектор плотности (удельной интенсивности) теплового потока \vec{q} , Вт/м² = кг/с³ пропорционален градиенту

температуры $\vec{\nabla} T$, K/м, где $\vec{\nabla}$ - вектор Гамильтона (набла), 1/м, T – температура, K:

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K) = (ккал/с·K) (м/К), который также удобно представить в виде $\lambda = \rho c_p a$, где ρ – плотность

жидкости или газа, ккал/м³, c_p – удельная изобарная теплоемкость среды, Дж/(кг·K) = (м²/с²) (1/К), a - коэффициент температуропроводности, м²/с. Этот закон используется при описании процессов теплопередачи движущихся жидкостей в уравнении энергии. В случае ламинарного режима течения результаты расчётов и опытов дают удовлетворительное согласование, однако для турбулентных потоков такого согласования уже нет. Приходится эмпирически вводить понятие турбулентной теплопроводности λ_t и соответствующий ей коэффициент турбулентной температуропроводности a_t . В результате вектор плотности теплового потока \vec{q} становится уже нелинейно связанным с градиентом температуры. Но в аналитическом виде, аналогичном закону теплопроводности Фурье в векторном виде, такой связи для турбулентных течений пока ещё не записано. В данной работе выполнено степенное обобщение формулы Фурье для плотности теплового потока в жидкости, которое в зависимости от значения показателя степени может описывать теплопередачу как при ламинарном, так и при турбулентном течении жидкости.

Соответствующее определяющее соотношение для вектора плотности теплового потока использовано для записи дифференциального уравнения энергии, позволяющего решать краевые задачи для теплообмена турбулентных течений. Также это обобщение может быть использовано для описания поведения степенных жидкостей и течений растворов полимеров, проявляющих эффект Томса.

Степенное обобщение формулы Фурье

Формулу Фурье для плотности теплового потока q при передаче количества теплоты за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси y можно записать следующим образом:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy} \quad (2.1)$$

Эту формулу можно обобщить в следующем виде:

$$q = -x_m \rho \left[a \frac{d(c_p T)^{(2m+1)}}{dy} \right]^{3/(4m+3)} \quad (2.2)$$

В этом выражении m - показатель степени, который может принимать различные положительные значения, x_m – безразмерный коэффициент, зависящий от этого показателя степени. Формулу (2.2) также можно записать в следующем виде:

$$q = -x_m \rho \left[a c_p^{(2m+1)} \frac{dT^{(2m+1)}}{dy} \right]^{3/(4m+3)} \quad (2.3)$$

Её также можно представить в виде удобном для дальнейшего векторного обобщения:

$$q = -x_m \rho \left[(2m + 1) a \right]^{3/(4m+3)} c_p^{3/(4m+3)} \frac{T^{6m}}{T^{4m+3}} \frac{dT}{dy} \quad (2.4)$$

При $m = 1$ и величине $x_m = 1$ это выражение приводит к формуле Фурье, а при других m она даёт определяющее соотношение для плотности теплового потока, позволяющее использовать его при турбулентном течении жидкости. Обобщение на трёхмерный случай приводит к векторной формуле:

$$\vec{q} = -x_m \rho \left[(2m + 1) a \right]^{3/(4m+3)} c_p^{3/(4m+3)} \left(\frac{T^3}{(\vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} T)} \right)^{2m/(4m+3)} \vec{\nabla} T \quad (2.5)$$

где $\vec{\nabla}$ - вектор Гамильтона (набла). В несколько другом, более компактном виде эту формулу можно записать так:

$$\vec{q} = -x_m \rho M \left(\frac{T^3}{\vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} T} \right)^{2m/(4m+3)} \vec{\nabla} T \quad (2.6)$$

, где для краткости записи обозначено:

$$M = (2m + 1)^{3/(4m+3)} a^{3/(4m+3)} c_p^{3(2m+1)/(4m+3)} \quad (2.7)$$

Уравнение энергии можно представить [3-6] в виде:

$$\rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q}, \quad (2.8)$$

где содержится материальная производная $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{w}$, в которой \vec{w} – вектор скорости частицы среды. После подстановки вектора интенсивности теплового потока согласно (2.6) в это уравнение имеем:

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{w} \cdot \vec{\nabla}) T \right) = -\vec{\nabla} \cdot x_m \rho M \left(\frac{T^3}{\vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} T} \right)^{2m/(4m+3)} \vec{\nabla} T \quad (2.9)$$

В компонентном виде уравнение энергии (2.9) можно записать следующим образом:

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_k \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) = x_m \rho M \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{T^3}{\frac{\partial T}{\partial x_k} \frac{\partial T}{\partial x_k}} \right)^{4m+3} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.10)$$

Аналитическое решение задачи о течении жидкости в трубе при постоянном значении плотности теплового потока на стенке

Рассмотрим гидродинамически и термически стабилизированное турбулентное течение несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами в прямой круговой трубе под действием постоянного градиента давления вдоль оси и с постоянной интенсивностью теплового потока на стенке трубы $qw = \text{const}$. Вдали от входа поля скоростей и температур не меняются вдоль оси трубы от сечения к сечению. Уравнение неразрывности при этом удовлетворяется автоматически. Трение и теплопередача

определяются двумя параметрами – безразмерными числами Прандтля и Рейнольдса:

где R – радиус трубы, u_{cp} – средняя скорость, ν – кинематическая вязкость, a – коэффициент температуропроводности. Течение в трубе будем рассматривать в цилиндрической системе координат, в которой радиальная координата r отсчитывается от оси трубы, по которой направлена координата z в направлении потока, при этом $0 \leq r \leq R$. Закон распределения теплового потока по сечению трубы можно получить исходя из следующих допущений, справедливых для рассматриваемой задачи [4]:

- 1) тепловым потоком в направлении оси трубы можно пренебречь, что означает, что вектор \vec{q} имеет только одну, радиальную компоненту, $q = q(r)$;
- 2) производная температуры $\frac{\partial T}{\partial z}$, так же, как и давления $\frac{dp}{dz}$, не зависит от радиальной координаты, а является только функцией z .

Уравнение энергии в цилиндрической системе координат для течения в трубе с постоянным тепловым потоком $q_w = \text{const}$ на стенке этой трубы имеет вид, учитывая допущение 1:

$$\rho \cdot c_p u \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r q) \quad (3.1)$$

Здесь u – продольная скорость жидкой частицы, $u = u(r)$. Запишем граничные условия исходя из требования постоянства плотности теплового потока на стенке трубы и нулевой производной температуры на оси вследствие симметрии:

$$q|_{r=R} = q_w ; \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.2)$$

Умножая левую и правую части уравнения (3.1) на $r dr$ и интегрируя в пределах от 0 до R , с учётом того, что $\frac{\partial T}{\partial z} = \text{const}$, получаем:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2q_w}{\rho \cdot c_p u_{cp} R} \quad (3.3)$$

Интегрирование этого уравнения даёт:

$$T(z) = A z + T_0, \quad A = 2q_w / (\rho \cdot c_p u_{cp} R) \quad (3.4)$$

где T_0 – температура в нулевом сечении, при $z = 0$. Согласно выражению (3.3), температура является линейной функцией осевой координаты z . Это означает, что и температура стенки T_w и среднemasсовая (среднекалометрическая) температура T_f являются тоже линейными функциями z . Но при этом разность $T_w - T_f$ остаётся постоянной по длине термически стабилизированного участка $T_w - T_f = \text{const}$. Далее будем искать решение задачи в виде:

$$T(r, z) = T_0 + Az + T(r) \quad (3.5)$$

С учётом (3.3) из уравнения (3.1) имеем выражение для распределения плотности радиального теплового потока q по сечению трубы:

$$q = \frac{2q_w}{R} \int_r^R \frac{u}{u_{cp}} dr \quad (3.6)$$

Видно, что этот закон распределения теплового потока зависит от профиля скоростей. Для турбулентного течения можно использовать степенное обобщение формулы Ньютона [7,8] для касательного напряжения $\tau = \rho \nu \frac{du}{dy}$, которое записывается в виде:

$$\tau = \rho \chi_n \left(\nu \frac{du}{dy} \right)^{1/4} \quad (3.7)$$

В этом выражении $\chi_n = 0.019746$ – феноменологическая константа. Заметим, что для течения в трубе такая формула для касательного напряжения приводит для коэффициента сопротивления к формуле Блазиуса. Для дальнейших выкладок полезно ввести в рассмотрение безразмерные величины:

$$V = \frac{u}{V_*}, \quad \eta = \frac{r}{R}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (3.8)$$

где V_* – динамическая скорость, выражаемая [4] через модуль касательного напряжения на стенке $|\tau_w|$. Использование выражения (3.7) для расчёта течения в трубе приводит к следующим безразмерным профилю скорости и средней скорости по сечению трубы [7]:

$$V = \left(\frac{Re_*}{5\chi_n^4} \right)^{1/7} [1 - \eta^5]^{1/7}, \quad V_{cp} = 0.934276 \left(\frac{Re_*}{5\chi_n^4} \right)^{1/7}, \quad (3.9)$$

где Re_* – число Рейнольдса, вычисленное по

$$Re = \frac{2Ru_{cp}}{\nu} \quad Pr = \frac{\nu}{a}$$

динамической скорости:

$$Re_* = \frac{V_* R}{\nu}, \quad (3.10)$$

Связь между числом Re_* по динамической скорости и числом Рейнольдса $Re = \frac{2Ru_{cp}}{\nu}$, вычисляемом по средней скорости даёт формула:

$$Re = 13.985077 Re_*^{8/7} \quad (3.11)$$

Закон распределения величины q согласно (3.6), используя безразмерные величины, можно записать в виде:

$$q = -\frac{2q_w}{\eta} \int \eta \frac{V}{V_{cp}} d\eta \quad (3.12)$$

После подстановки величин V и V_{cp} имеем:

$$q = -\frac{q_w}{0.934276\eta} (2 \int (1 - \eta^5)^{1/7} d\eta) \quad (3.13)$$

Интеграл в этом выражении приводит к гипергеометрической функции, которую на

интервале [0;1] можно аппроксимировать с точностью до 1% и представить его в следующем виде:

$$2 \int_0^1 [1 - \eta^5]^{1/7} \eta d\eta \cong \eta^2 - 0,0657234\eta^{10}$$

В результате для плотности теплового потока согласно (3.13) имеем:

$$q = -q_w \left(\frac{\eta - 0,0657234\eta^9}{0,934276} \right) + C_1$$

Из условия равенства нулю теплового потока на оси трубы $q|_{\eta=0} = 0$ следует, что $C_1 = 0$. Тогда условие (3.2), согласно которому $q|_{\eta=1} = q_w$ также выполняется. Выражение в скобках, с точностью не менее 5%, можно аппроксимировать в виде линейной функции, в результате чего выражение для распределения плотности теплового потока по сечению трубы принимает вид:

$$q = q_w \eta \quad (3.14)$$

С другой стороны, определяющее уравнение для теплового потока, являющееся аналогом закона теплопроводности Фурье, согласно выражения (2.2) для рассматриваемого течения будет

$$q = -x_m \rho \left[a \frac{d(cT)^{(2m+1)}}{dr} \right]^{\frac{3}{(4m+3)}} \quad (3.15)$$

Сравнение правых частей выражений (3.14) и (3.15) для определяющего уравнения теплового потока даёт уравнение распределения температуры по сечению трубы:

$$x_m \rho \left[a \frac{d(cT)^{(2m+1)}}{dr} \right]^{\frac{3}{(4m+3)}} = q_w \eta \quad (3.16)$$

Введём в рассмотрение безразмерную температуру:

$$\theta = \frac{\lambda T}{q_w R} \quad (3.17)$$

Тогда уравнение (3.16) можно записать в виде:

$$x_m \rho \left[\left(\frac{a}{R} \right)^{\frac{3}{(4m+3)}} \left(c \frac{q_w R}{\lambda} \right)^{\frac{3(2m+1)}{(4m+3)}} \right] \left(\frac{d\theta^{(2m+1)}}{d\eta} \right)^{\frac{3}{(4m+3)}} = q_w \eta,$$

или:

$$\frac{d\theta^{(2m+1)}}{d\eta} = \left(\frac{1}{x_m} \right)^{(4m+3)/3} \left[\left(\frac{\rho}{q_w} \right)^{1/3} \left(\frac{a}{R} \right) \right]^{2m} \eta^{(4m+3)/3}$$

Интегрирование этого уравнения даёт:

$$\theta^{(2m+1)} = \left(\frac{1}{x_m} \right)^{(4m+3)/3} \left[\left(\frac{\rho}{q_w} \right)^{1/3} \left(\frac{a}{R} \right) \right]^{2m} \frac{3}{(4m+6)} \eta^{(4m+6)/3} + C_2,$$

где C_2 - постоянная интегрирования. Отсюда:

$$\theta = \left(\frac{1}{x_m} \right)^{\frac{(4m+3)}{3(2m+1)}} \beta \left[\eta^{\frac{(4m+6)}{3}} + C_2 \right]^{\frac{1}{(2m+1)}}, \quad (3.18)$$

где:

$$\beta = \frac{\left(\frac{3}{4m+6} \right)^{\frac{1}{2m+1}}}{Q^{\frac{2m}{(2m+1)}}} \quad (3.19)$$

Здесь безразмерная величина Q характеризует интенсивность теплового потока на стенке трубы:

$$Q = \left(\frac{q_w}{\rho} \right)^{1/3} \left(\frac{R}{a} \right) \quad (3.20)$$

Постоянную интегрирования C_2 найдём из условия, согласно которому среднее взвешенное значение θ должно быть равным нулю. Это требование вытекает из того, что зависимость средневзвешенной температуры от z в решении (3.5) полностью учтено двумя первыми слагаемыми. Поэтому средневзвешенное значение последнего слагаемого должно быть равно нулю [9]. В безразмерном виде это условие имеет вид:

$$\int_0^1 \theta \frac{V}{V_{cp}} \eta d\eta = 0$$

Подстановка θ и $\frac{V}{V_{cp}}$ приводит к уравнению, из которого можно найти величину C_2 :

$$\int_0^1 \left(\eta^{\frac{4m+6}{3}} + C_2 \right)^{\frac{1}{2m+1}} (1 - \eta^5)^{1/7} \eta d\eta = 0 \quad (3.21)$$

В таблице 1 приведены значения величины C_2 для нескольких значений показателя степени m .

Таблица 1

Значения величины C_1 от значений показателя степени m

m	0	1	2
C_2	-0,477	-0,312	-0,201

Для этих значений безразмерные профили температуры будут следующими согласно (3.18) и (3.19):

-- при $m=0$:
 $\theta = \beta(\eta^2 - 0,477); \beta = 1/2 \quad (3.22)$

-- при $m=1$:
 $\theta = \left(\frac{1}{x_1} \right)^{\frac{7}{9}} \beta (\eta^{\frac{10}{3}} - 0,312)^{1/3}; \beta = \left(\frac{3}{10} \right)^{1/5} / Q^{2/3} \quad (3.23)$

-- при $m=2$:
 $\theta = \left(\frac{1}{x_1} \right)^{\frac{11}{15}} \beta (\eta^{\frac{14}{3}} - 0,201)^{1/5}; \beta = \left(\frac{3}{14} \right)^{1/5} / Q^{4/5} \quad (3.24)$

Общее решение рассматриваемой задачи будет, согласно (3.5), следующим:

$$T(r, z) = T_o + Az + \frac{q_w R}{\lambda} \theta = T_o + \frac{2q_w}{\rho c_{cp} u_{cp} R} z + \left(\frac{q_w R}{\lambda} \right) \left(\frac{1}{x_m} \right)^{\frac{(4m+3)}{3(2m+1)}} \beta \left[\eta^{\frac{(4m+6)}{3}} + C_2 \right]^{\frac{1}{(2m+1)}} \quad (3.25)$$

Значения числа Нуссельта для задачи о течении в трубе при постоянном значении q_w

Таблица 2

Число Нуссельта для рассматриваемой задачи можно представить [4, 9] в виде:

$$Nu = \frac{2q_w R}{T(R,z) - T(z)}, \quad (4.1)$$

где величина $T(R, z) = T(r, z)|_{r=R}$ согласно (3.25), а $T(z)$ определена согласно (3.4). Тогда, учитывая выражения (3.25) и (3.5):

$$Nu = \frac{2x_m^{(4m+3)}}{\beta(1+C_2)^{(2m+1)}} \quad (4.2)$$

Для разных значений m таблицы 1 выражения для числа Нуссельта будут следующими:

а) При $m=0$, соответствующему закону теплопроводности Фурье, когда $x_m = 1$:

$$Nu = 4/0,523 = 7,65, \quad (4.3)$$

что практически согласуется со значением числа Нуссельта, вычисленному для турбулентного течения по интегралу Лайона:

$$\frac{1}{Nu} = 2 \int_0^1 \left(\int_0^\eta \frac{g}{g_{cp}} \eta d\eta \right)^2 \frac{d\eta}{\eta} = \left(\frac{2}{0,9342762} \right) \int_0^1 \left(\int_0^\eta (1-\eta^5)^{\frac{1}{2}} \eta d\eta \right)^2 d\eta = \frac{2 \cdot 0,0596713}{0,9342762} = 0,136274$$

Отсюда $Nu = 7.31$. Разница между значениями 7.65 и 7.31 связана с тем, что при вычислении $Nu = 7.65$ использовалось приближение (3.15), которое внесло некоторую погрешность.

б) При $m=1$ число Нуссельта согласно (4.2) и (3.19) будет:

$$Nu = x_{m1}^{7/9} \cdot 3,384Q^{2/3} \quad (4.4)$$

в) При $m=2$ число Нуссельта будет:

$$Nu = x_{m2}^{11/15} \cdot 2,846Q^{4/5} \quad (4.5)$$

Выполним расчёты числа Нуссельта для турбулентного течения воздуха и воды в трубе радиусом $R=0.025$ м при разных значениях постоянной интенсивности теплового потока на стенке трубы:

$$q_w = 10^2 \text{ Вт/м}^2; 2) q_w = 10^3 \text{ Вт/м}^2; 3) q_w = 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

Физические характеристики теплоносителей будем считать постоянными и равными:

а) для воздуха плотность $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$, коэффициент температуропроводности $a = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ б) для воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $a = 1.45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

Соответствующие значения безразмерного параметра $Q = \left(\frac{q_w}{\rho}\right)^{1/3} \left(\frac{R}{a}\right)$ приведены в таблице 2.

Значения величины Q для разных значений q_w

$q_w, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$Q, \text{воздух}$	$Q, \text{вода}$
10^2	$5,596 \cdot 10^3$	$8,002 \cdot 10^4$
10^3	$1,206 \cdot 10^4$	$1,724 \cdot 10^3$
10^4	$2,597 \cdot 10^4$	$3,715 \cdot 10^3$

Числа Нуссельта вычислим по формулам (4.4) и (4.5), принимая ориентировочные значения коэффициентов x_m равными:

а) $x_{m1} = 10^{-2}$ при $m=1$; б) $x_{m2} = 10^{-3}$ при $m=2$.

Расчётные значения числа Nu приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения числа Нуссельта

m	$q_w, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$Nu, \text{воздух}$	$Nu, \text{вода}$
1	10^2	29,63	214,25
	10^3	49,46	357,44
	10^4	82,48	596,31
2	10^2	13,15	150,25
	10^3	24,31	277,65
	10^4	44,91	513,13

Заключение

Ввиду того, что в современной литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по теплообмену для турбулентного течения теплоносителя в трубе с постоянной интенсивностью теплового потока, в рамках этой работы пока нет возможности определить для этого режима течения значения показателя m и соответствующего ему коэффициента x_m . В принципе, подбирая пару величин (m, x_m), можно добиться согласования расчёта и эксперимента. Следует заметить, что порядок величин чисел Нуссельта в таблице 3 согласуется с их порядком в опытах, результаты которых можно приближённо описывать [4,5,6] зависимостью числа Стентона St от коэффициента сопротивления ξ в виде $St = \xi / 8$. Учитывая, что $St = Nu / (Re Pr)$, отсюда следует $Nu = (\xi / 8) Re Pr$. Здесь для турбулентного режима течения в трубе можно использовать формулу Блазиуса

$$\xi = 0.3164 / Re^{0.25}$$

. Тогда при числе $Pr = 1$ число Нуссельта $Nu = 0.03955 Re^{0.75}$. При $Re = 10^4$ число $Nu = 39.55$, при $Re = 10^5$ оно равно $Nu = 222.41$. Видно, что порядок этих цифр согласуется с результатами таблицы 3. Примерно те же результаты даёт экспериментальная формула Кутателадзе [4]: $Nu = 0.115 (\xi / 8)^{0.5} Re Pr^{0.25}$.

Для определения конкретных значений показателя степени m и соответствующего ему коэффициента x_m требуется проведение вычислительных процедур для таких турбулентных неизотермических течений, в том числе и для течений в трубах, у которых имеются достоверные экспериментальные данные.

Литература

1. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат. 1956–321 с.
2. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учебник для вузов / В. Л. Ерофеев, П. Д. Семенов, А. С. Пряхин; под ред. В. Л. Ерофеева. — М.: Академкнига, 2008. - 488 с.
3. Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники: учеб, пособие для вузов / В. И. Ляшков. — М.: Абрис, 2012. — 318 с.
4. Петухов Б.С. Вопросы теплообмена (избранные труды). М.: Наука. 1987–278 с.
5. Кудинов, И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях: Монография / И.В. Кудинов, В.А. Кудинов и др. - СПб.: Лань, 2015. - 208 с.
6. Видин, Ю.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена: Монография / Ю.В. Видин, В.В. Иванов, Р.В. Казаков. - М.: Инфра-М, 2018. - 480 с.
7. Павловский В.А. Степенное обобщение формулы Ньютона для касательного напряжения в жидкости в форме тензорного реологического соотношения и вытекающие из него варианты построения модели течения. // IX Поляховские чтения: Материалы международной научной конференции по механике, 9-12 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия -СПб : Издательство ВВМ, 2021., 226-227 с.
8. В. А. Павловский, С. А. Кабриц, «Расчет турбулентного пограничного слоя плоской пластины», Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 10. Прикл. матем. Информ. Проц. упр., 17:4 (2021), 370–380 с.
9. Теплофизика. Неравновесные процессы теплопереноса: Учебное пособие/ В.И.Байков и др.-Минск: Высшая школа. 2018–476 с.
10. Крайнов А.Ю., Моисеева К. М. Конвективный теплоперенос и теплообмен: учеб. пособие. – Томск: STT, 2017. – 80 с.

References

1. Mikheev M.A. Basics of heat transfer. M.: Gosenergoizdat. 1956 – 321 p.
2. Erofeev V. L. Heat engineering: textbook for universities / V. L. Erofeev, P. D. Semenov, A. S. Pryakhin; edited by V. L. Erofeev. — M.: Akademkniga, 2008. - 488 p.
3. Lyashkov V. I. Theoretical foundations of heat engineering: textbook, manual for universities / V. I. Lyashkov. — M.: Abris, 2012. — 318 p.
4. Petukhov B.S. Issues of heat exchange (selected works). Moscow: Nauka. 1987 – 278 p.
5. Kudinov, I.V. Mathematical modeling of hydrodynamics and heat transfer in moving fluids: Monograph / I.V. Kudinov, V.A. Kudinov et al. - St. Petersburg: Lan, 2015. - 208 p.
6. Vidin, Yu.V. Engineering methods for calculating heat transfer problems: Monograph / Yu.V. Vidin, V.V. Ivanov, R.V. Kazakov. - M.: Infra-M, 2018. - 480 p.
7. Pavlovsky V.A. A power-law generalization of Newton's formula for shear stress in a liquid in the form of a tensor rheological relation and the resulting options for constructing a flow model. // IX Polyakhov Readings: Materials of the International Scientific Conference on Mechanics, March 9-12, 2021, St. Petersburg, Russia - SPb: Publishing house VVM, 2021., p. 226-227.
8. V. A. Pavlovsky, S. A. Kabrits, Calculation of the turbulent boundary layer of a flat plate, Vestn. St. Petersburg. un. Ser. 10. Approx. matem. Inform. Percent upr., 17:4 (2021), 370-380.
9. Thermal physics. Non-equilibrium processes of heat and mass transfer: Textbook / V. I. Baykov et al. - Minsk: Higher School. 2018 - 476 p.
10. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. Convective heat transfer and heat transfer: textbook. allowance. - Tomsk: STT, 2017.- 80 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Алексеевич Павловский, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Valery A. Pavlovsky, Dr. Sci. (Phys & Math), professor of department of thermophysical foundations of ship power engineering, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted: 30.12.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing: 13.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication: 08.04.2022.

Научная статья

УДК 004.942:004.031.043

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.055>

Функции интерпретации динамики подводных объектов в нестационарной среде

Ю.И. Нечаев¹, Д.В. Никущенко¹ research@smtu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается построение и анализ функций интерпретации моделей нестационарной динамики подводных объектов (ПО) новых поколений на основе функциональных пространств современной теории катастроф. Формальный аппарат концептуальных решений и принципов построения функций интерпретации реализован в нестационарной динамической среде в рамках принципа конкуренции. Процедуры функций интерпретации основаны на использовании различных моделей взаимодействия в зависимости от уровня действующих возмущений. Неопределенность и неполнота исходной информации в динамике взаимодействия ПО в нестационарной среде, определили подход к построению функций интерпретации при построении математического описания задач нестационарной динамики ПО на основе концепции мягких вычислений и выявления «скрытых» знаний. Разработанные модели и алгоритмы интерпретации нестационарной динамики ПО реализованы в функциональном блоке моделирования многофункционального программного комплекса динамической визуализации нестационарной динамики ПО в режиме экстренных вычислений.

Ключевые слова: функции интерпретации, нестационарная динамика, подводный объект, эволюционирующая среда, современная теория катастроф, экстренные вычисления.

Для цитирования: Нечаев Ю.И., Никущенко Д.В. Функции интерпретации динамики подводных объектов в нестационарной среде. 2022. № 2 часть 2. С. 139—145.

Финансирование: Настоящее исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ № 075–03–2022–221 от 12.01.2022.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.055>

Interpretation function of dynamic of an underwater vehicle in non-stationary environment

Yuri I. Nechaev¹, Dmitry V. Nikushchenko¹, research@smtu.ru

¹St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract The construction and analysis of the interpretation functions of the models of unsteady dynamics of new generation an underwater vehicle (UV) based on the modern theory of disasters are considered. The formal apparatus of conceptual solutions and principles of constructing interpretation functions is implemented in a non-stationary dynamic environment within the framework of the principle of competition. The procedures of the interpretation functions are based on the use of various interaction models depending on the level of acting disturbances. The uncertainty and incompleteness of the initial information on the dynamics of the interaction of underwater vehicles in a non-stationary environment determined the approach to constructing interpretation functions when constructing a mathematical description of the problems of non-stationary dynamics of underwater vehicles based on the concept of soft computing and the identification of “hidden” knowledge. The developed models and algorithms for interpreting unsteady dynamics of submarines are implemented in the functional block for modeling a multifunctional software complex for dynamic visualization of unsteady dynamics of underwater vehicles in emergency computing mode Urgent Computing.

Key words: interpretation function, non-stationary dynamic, unmanned underwater object, evolutionary environment, modern catastrophe theory, urgent computing.

For citation: Yuri I. Nechaev, Dmitry V. Nikushchenko. Interpretation function of dynamic of an underwater vehicle in non-stationary environment. 2022. № 2 part 2. P. 139—145.

Financial Support: This study was carried out within the framework of the state assignment for the implementation of research works No. 075-03-2022-221 dated 12.01.2022.

Введение

Концептуальный базис функций интерпретации пространств поведения и управления СТК, предусматривает построение формального аппарата синтеза моделей нестационарной динамики ПО и преобразования информации при интерпретации ситуаций на основе динамической модели катастроф. Рассмотрены основные понятия и алгоритмы построения функций интерпретации,

используемые в задачах интеграции аналитической и геометрической компонент СТК в сложной динамической среде (рис.1). Реализация стратегии построения функций интерпретации при исследовании нестационарной динамики ПО связана с использованием следующих определений.

Определение 1. Динамическая модель СТК определяет функцию интерпретации множеств в пространстве управляющих переменных, характеризующих динамическую среду управления,

интегрирующую динамику взаимодействия, внешнюю среду и структурные изменения в поведении ПО. При реализации управляющих воздействий система знаний, определяющая функции интерпретации, может эволюционировать к различным состояниям в зависимости от особенностей внешней среды и динамики взаимодействия.

Определение 2. В процессе эволюции ПО в нестационарной динамической среде возникают состояния устойчивого и неустойчивого равновесия, определяемые множествами динамической модели СТК, исследование которых на основе функций интерпретации ведется в рамках принципа конкуренции в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

Определение 3. При недостаточной эффективности управляющих воздействий происходят резкие изменения в пространстве знаний, характеризующем функции интерпретации нестационарной динамики ПО при потере устойчивости и возникновении катастрофы при воздействии значительных возмущений.

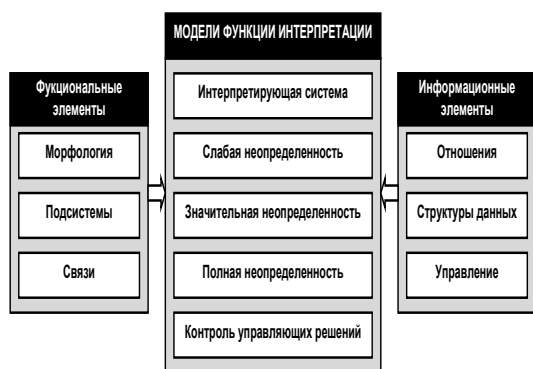


Рис. 1. Модели функций интерпретации нестационарной динамики ПО

Моделирование нестационарной динамики ПО с помощью функций интерпретации осуществляется на основе различных методов исследования эволюционирующих систем.

Проблема выбора решения при интерпретации данных о взаимодействии ПО в эволюционирующей среде состоит в реализации последовательности операций анализа иерархической структуры с использованием методов моделирования. Выделенные в этой структуре критериальный базис и элементарные подзадачи анализируются в процессе разработки алгоритмов интерпретации.

Формальные модели построения функций интерпретации

Рассмотрим формальную модель процесса обработки информации при построении функций интерпретации при синтезе нелинейных нестационарных систем. Представим эту модель в виде элементов, определяющих информационную базу функции интерпретации нестационарной динамики ПО в пространствах поведения и управления СТК, в следующем виде [4]:

$$M(S) = (F_1(X, u), F_2(Y, Z), F_3(X, Q_1), F_4(X, Q_2), F_5(X, Q_1), F_6(X, Q_2), F_7(Q_3, Q_4), F_8(Q_3, Q_4), F_9(S)), \quad (1)$$

где $F_1(X, u)$ — функция, определяющая структуру алгоритмов предварительной обработки информации X ; u — возмущающее воздействие; $F_2(Y, Z)$ — функция, определяющая состав алгоритмов, обеспечивающих формирование из выходной информации Y элементов Z , определяющих состояние ПО; $F_3(X, Q_1), F_4(X, Q_2)$ — функции, определяющие состав алгоритмов, реализующих вычисление статических Q_1 и динамических Q_2 информационных признаков с использованием полезной информации J (useful effective); $F_5(X, Q_3), F_6(X, Q_4)$ — функции, определяющие состав алгоритмов, обеспечивающих вычисление статических Q_3 и динамических Q_4 информационных признаков с учетом геометрических характеристик NN-системы; $F_7(Q_3, Q_4), F_8(Q_3, Q_4)$ — функции, определяющие алгоритмы вычисления диагностических признаков с использованием нормативных значений и критериальных уравнений; $Q_{CR} = (Q_{CR})^s \cup (Q_{CR})^d$; $F_9(S)$ — функция, обеспечивающая идентификацию текущей ситуации S с помощью системы $F(S)$.

Формальная модель преобразования информации нестационарной динамики ПО при построении функций интерпретации имеет вид:

$$\{R_1^n(t) \times R_1^r(t) \rightarrow R_1(t), \dots, R_m^n(t) \times R_m^r(t) \rightarrow R_m(t)\}, \quad (2)$$

где $\{R_1^n(t), \dots, R_m^n(t)\}$ — пространство поведения, а $\{R_1^r(t), \dots, R_m^r(t)\}$ — пространство управления, определяющие результат преобразования информации, на основании которого осуществляется реконструкция исходной формальной модели катастрофы; $j=1, \dots, m$ — последовательность событий, определяющих эволюцию системы.

Задача построения функции интерпретации нестационарной динамики ПО рассматривается как поиск экстремума критерия $C_R(F(M))$, обеспечивающего выделение необходимого класса моделей $F(M)$ на множестве $\Phi(M)$ математических описаний мультимодельного комплекса (ММК):

$$F(M)^* = \arg \min_{F(M) \in \Phi(M)} C_R(G(M)). \quad (3)$$

Условие (3) формулирует задачу выбора, для решения которой необходимо задать вид и объем исходной информации, класс базисных функций (операторов) из которых формируется множество $\Phi(M)$, определить способ генерации моделей $F(M)$ вместе с методом оценивания параметров, выбрать критерий сравнения моделей, указать метод оптимизации $C_R(F(M))$. Имеющаяся выборка данных $[X, Y]$, содержит результаты n наблюдений входных переменных m и результаты выхода y . Исходные данные представляются в виде матрицы X и вектора Y :

$$X = [x_{ij}], i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

$$Y = [y_1, \dots, y_m]^T, (n \geq m).$$

Особый интерес при реализации формальных моделей (1) и (2) представляют методы анализа нелинейных динамических систем и современные методы обработки данных физического эксперимента на основе быстродействующих вычислительных средств [3].

Функции интерпретации нестационарной динамики ПО в пространстве поведения

Построение формального аппарата оценки функционального состояния многофункционального программного комплекса (МПК) в пространстве поведения осуществляется с помощью модели «сущность – связь» (ER-модель) [4]. Объекты реального мира в этой модели представляются «сущностями» (entities), а ассоциации между ними – отношениями (relationship).

Рассматривая отношения степени n , можно формально представить для сущностей $Q_1(E), \dots, Q_n(E)$ отношение в виде набора упорядоченных n -кортежей:

$$R \in Q_1(E) \times \dots \times Q_n(E). \quad (5)$$

При условии, что

$$\varepsilon \subset \{Q_1(E), \dots, Q_n(E)\}, \quad (6)$$

ограничение $R[\varepsilon]$ представляет собой набор

$$\{r(\varepsilon), r \in R\}, \quad (7)$$

где $r(\varepsilon)$ – подкортеж, содержащий только экземпляры сущностей из ε .

Определим через $Q_i(E)^*$ набор всех упорядоченных сущностей из $Q_i(E)$, которые участвуют в хотя бы один раз в рассматриваемой формализации:

$$Q_i(E)^* = \{Q(e), R(Q_i(E)), Q(e) \neq 0\}. \quad (8)$$

Введем следующие обозначения

$$m_L Q_i(E, R) = \min_{Q(e) \in Q_i(E)} |R(Q_i(E))|; \quad (9)$$

$$m_U Q_i(E, R) = \max_{Q(e) \in Q_i(E)} |R(Q_i(E))| \quad (10)$$

где $|\bullet|$ – количество элементов в заданном множестве.

Функции интерпретации, обеспечивающие концептуальное моделирование состояния ПО, а также общее поведение операторов связи при реализации триады: «классическая модель» – «модель на основе концепции мягких вычислений» – модель «УС», обеспечивают наиболее важные аспекты эволюционной динамики ситуации (поддержание гомеостаза и управления поведением), в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды. Коррекция поведения системы достигается за счет повторяющихся циклов обучения и производства новой информации на основе СТК.



Рис.2 Функции интерпретации в пространстве поведения

Методология исследований причинно-следственных задач динамики взаимодействия в пространстве поведения представлена рядом общих принципов и направлена на целостное изучение реальных процессов и явлений при интерпретации эволюционной динамики ПО. Эти принципы отражают наиболее существенные свойства и черты изучаемого процесса. Среди них следует выделить:

- принцип *междисциплинарного* подхода, указывающий на многопредметность описания процессов и явлений нестационарной динамики ПО для различных приложений;

- принцип *структурно-функционального и динамического единства*, определяющий описание закономерностей функционирования и развития приложений нестационарной динамики ПО в их единстве и требующий исследования свойств процессов взаимодействия во всем их многообразии (объяснение процессов взаимодействия, раскрытие характера поведения ПО);

- принцип *многоуровневости*, связанный с изучением взаимодействия ПО в нестационарной среде как определенной целостности и как образования, включенного в более сложную систему, что позволяет исследовать общие особенности и отдельные черты эволюционной динамики ПО.

Таким образом, при многоуровневом описании процессов обработки информации каждый из уровней может быть разбит на ряд подуровней, количество которых отражает глубину проникновения в сущность исследуемого процесса на каждом уровне иерархии. Отображение объектов и событий в пространстве признаков иерархии характеризует информационный образ конкретного приложения в виде связи «структура – свойство», а знание в рамках информационного образа – как результата измерения определяющего параметра исследуемого объекта с эталоном. При этом необходимо сопоставлять результаты измерений с данными моделирования. В момент достижения параметром критического значения программа МПК передает управление модулю регистрации результатов исследования в виде совокупности особенностей функционирования и количественных характерных признаков свойств контролируемой ситуации.

Преобразование информации при решении задач нестационарной динамики ПО в пространстве поведения связано с тем, что обычные методы оценки динамических характеристик случайных процессов позволяют установить весовую функцию стационарного линейного объекта при условии некоррелированности внутренних возмущений с входными переменными на основе интегрального уравнения Винера–Хопфа [3]. Отыскание весовой функции с помощью этого уравнения является некорректно поставленной задачей [4], для решения которой используют методы регуляризации.

Особенности исследуемых процессов волнения и качки, а также передаточных функций качки позволяют модифицировать алгоритмы интерпретации с учетом возможности их реализации в режиме УС [6]. Процедура такого анализа предусматривает последовательность операций обработки данных динамических измерений моделирования в рамках концепции конкуренции [2]).

На начальном этапе функционирования МПК решается задача идентификации. Реализация алгоритма идентификации предполагает выполнение следующих операций:

- выделяется класс объекта и формируется настраиваемая модель;
- выбирается критерий качества идентификации, характеризующие различие между входами и выходами объекта и настраиваемой модели;
- строится алгоритм идентификации, обеспечивающий минимум потерь с ростом времени t на основании данных измерений и параметров модели.

Разработанная на основе приведенного алгоритма модель формализует информационные процессы, направленные на достижение цели идентификации – оценки параметров внешней среды и ситуации взаимодействия на основе данных динамических измерений. Эффективное решение этой задачи обеспечивает процедуры выделения определяющих параметров, оценки опасности ситуации и прогноз ее развития. В качестве конкурирующих вычислительных технологий в задачах идентификации используются нейросетевые ансамбли, а в задачах аппроксимации и прогноза – многослойные перцептроны.

Функции интерпретации нестационарной динамики ПО в пространстве управления

Вычислительные технологии в пространстве управления формируются на основе иерархических структур с использованием различных моделей [4]. Иерархическая декомпозиция задач выбора решений представлена на рис. 3 в виде совокупности целей G_i и алгоритмов интерпретации A_i .

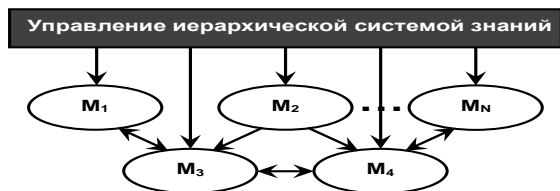


Рис.3. Иерархическая декомпозиция задач ИП в нечеткой среде пространства управления

Обозначая базовое множество решений, через W , а задачи A_i как нечеткое подмножество W , получаем результат вывода B_i в виде нечеткого подмножества единичного интервала I , что позволяет представить импликацию нечеткого множества задачи интерпретации:

$$\mu_H(\omega, i) = \min_{v \in V} (1, (1 - \mu_A(\omega) + \mu_B(i))), \quad (11)$$

где H – нечеткое подмножество на $W \times I, w \in W, i \in I$, а высказывания $H_i (i=1, \dots, q)$ преобразуются в множество D :

$$D = H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_q \quad (12)$$

Для каждого $(w, i) \in W \times I$ можно записать выражение, определяющее ФП

$$\mu_D(w, i) = \min_{w \in W} (\mu_{H_j}(w, i))_{j=1, \dots, q} \quad (13)$$

На основе соотношений (11) – (13) НФС формирует способ выбора альтернатив, каждая из которых описывается нечетким подмножеством C из W . Удовлетворительность альтернативы находится на основе композиционного правила вывода $G = C \circ D$, где G – нечеткое подмножество интервала I .

Задача прогноза в пространстве управления обеспечивает оценку состояния ПО при выработке управляющих воздействий. Построение алгоритма прогноза формализуется как задача распознавания образов. Данные о прогнозируемой переменной на интервале упреждения образуют образ, класс которого определяется значением прогнозируемой переменной в некоторый момент времени за пределами данного интервала. Метод интерпретации в задаче нейропрогноза предполагает использование двух окон W_i и W_0 , которые перемещаются с заданным шагом во временной последовательности данных. Первое окно, получив такие данные, передает их на вход нейронной сети, а второе – на выход. Получающаяся на каждом шаге пара $W_i \rightarrow W_0$ используется как элемент обучающей выборки (распознаваемый образ, наблюдение).

В основу разработки вычислительной среды пространства управления при прогнозировании эволюционной динамики ПО положен подход, реализуемый путем предварительного анализа априорной информации о структуре динамической картины взаимодействия, описываемой временным рядом. Такая интерпретация представляет собой универсальную структуру, позволяющую моделировать процессы взаимодействия, характеризующиеся «быстрой» и «медленной» динамикой [3].

Прогноз на основе коротких временных рядов. Интерпретирующая модель прогноза в этом случае позволяет реализовать процедуру оценки динамики взаимодействия в режиме УС. Формальный аппарат моделей прогноза поведения ПО основан на концепции обработки информации с помощью коротких временных рядов, достоверность использования которых определяется данными математического и физического моделирования в пределах допустимой погрешности функционирования вычислительной среды МПК [4].

Вычислительная технология использования «скользящего окна», формируется на основе следующей стратегии: на первых шагах алгоритма обработка ведется в течение заданного интервала, а далее формируется «скользящее окно», длительность которого устанавливается на основе анализа данных, полученных на первых шагах работы алгоритма. Так, например, если в процессе обработки информации формирование «скользящего окна» достигается на первых трех шагах, то процедуру можно представить в следующем виде:

$$J(X) \rightarrow J_1(X) \rightarrow J_2(X) \rightarrow J_3(X) \rightarrow W_1(X), \dots, W_N(X), \quad (14)$$

где $J(X)$ – вектор измерений, определяющий поток информации после инициализации алгоритма; $J_1(X), \dots, J_3(X)$ – поток на первых шагах работы алгоритма (шаги соответствуют интервалам времени при

контроле динамики МДО); $W_1(X), \dots, W_N(X)$ – поток информации при движении «скользящего окна».

Таким образом, приведенный алгоритм представляет собой универсальную структуру, функциональность которой реализуется на основе принципа сложности и формальных процедур, позволяющих осуществлять параметрическую «настройку» адекватной модели и выделение «скользящего окна» для эффективного контроля динамических характеристик ПО.

Для решения проблемы использования ИНС в задачах прогноза [3] был модифицирован метод нормализации данных обучающего множества. В случае традиционной предобработки информации использовано преобразование:

$$X = \left[\frac{(X_i - X_{\min})(A - C)}{X_{\max} - X_{\min}} \right] + C, \quad (15)$$

где X_i – i -е значение множества X ; X_{\min} и X_{\max} – минимум и максимум ряда; A – приемлемое максимальное значение ряда X ; C – приемлемое минимальное значение ряда X .

В процессе модификации устанавливаются значения для A и C , учитывающие динамику исходного ряда ретроспективных наблюдений.

В связи со сложностью задачи многорежимного управления при прогнозе поведения ПО в условиях сложной динамики рассматривают одношаговый и многошаговый нейропрогноз. *Одношаговый прогноз* осуществляется только на один шаг вперед и используется для краткосрочных прогнозов. Результатом прогноза является не только конкретное значение, но и класс, к которому принадлежит переменная. *Многошаговый прогноз* предназначен для определения основного тренда и главных точек изменения тренда для некоторого промежутка времени в будущем. Прогнозируемая система на основе ИНС использует полученные (выходные) данные для моментов времени $k+1, k+2, \dots$ в качестве входных данных для прогноза на моменты времени $k+2, k+3$ и т.д.

Процесс построения прогнозирующей модели предусматривает предварительное определение количества используемых элементов временного ряда и ошибок прогноза в соответствии с общей стратегией прогнозирования. После выполнения этих операций схема построения нейронной сети (НС) на основе МПК включает решение задач структурного и параметрического синтеза.

Долгосрочный прогноз обеспечивает определение момента наступления неблагоприятного режима движения ПО t_0 и его продолжительность T_0 . Краткосрочный прогноз устанавливает время смены режима t_r так, чтобы ПО оказывалась в наиболее благоприятных условиях взаимодействия в течение интервала T_R . Процедура краткосрочного прогноза функционирует в рамках временного интервала, определяющего безопасный режим.

Практическая реализация функции интерпретации нестационарной динамики ПО

В качестве примера практической реализации функции интерпретации нестационарной динамики ПО рассмотрим структуру функций интерпретации в пространствах поведения и управления СТК, формируемых для исследуемой ситуации на основе

нейросетевого базиса. Модели нейродинамики (рис. 4) отображают преобразования информации при диагностике поведения ПО по множеству разнородных показателей, установленных в процессе моделирования.

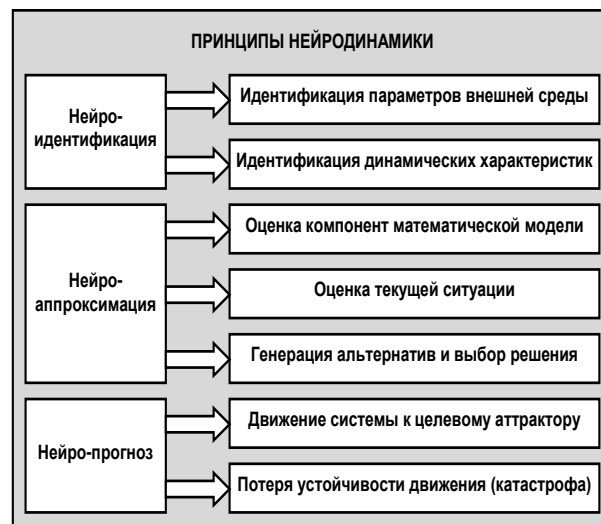


Рис. 4. Универсальная модель нейродинамики при реализации методов СТК

диагноза, поставленный нейронной сетью и степень уверенности в правильности результата, обеспечивается путем настройки сети на выделенном обучающем множестве данных. В задачах прогноза исходная информация разделяется на обучающую и тестирующую, а моделирование выполняют с целью повышения результатов прогноза с использованием данных экспериментальных исследований.

Приложения функции интерпретации реализуются в задачах построения аттракторных множеств и фрактальных отображений [3],[4], а также при формировании нечеткой системы знаний и ансамбля НС в процедурах логического вывода по прецеденту [3].

Оценка адекватности функции интерпретации нестационарной динамики ПО осуществляется путем сопоставления текущей $M[S(Cur)]$ и эталонной $M[S(Prec)]$ моделей на основе следующей аксиомы.

Аксиома 1. При оценке адекватности функции интерпретации в условиях значительной неопределенности разработанная модель функции интерпретации динамики ПО считается адекватной выделенному прецеденту при условии выполнения критерия адекватности в следующем виде:

$$CR\{M[S(Cur)], M[S(Prec)]\} \in \mu(tr), \quad (16)$$

где $\mu(tr)$ – функция принадлежности, определяющая значения порога нечеткого равенства ситуаций $\mu(tr) \in [0.8; 1.0]$.

Выбор прецедента осуществляется на основе модели нечеткого вывода [1],[2]. Механизм такого вывода предполагает использование вычислительной технологии, основанной на преобразовании априорных данных в рамках конкурирующих моделей, и формализуется следующим образом. Пусть множество прецедентов $\tau_i \in R$ ($i=1, \dots, N$) расположено в N -мерном пространстве, где каждый прецедент представлен вектором $a_j = (a_{j1}, \dots, a_{jn})$ ($j=1, \dots, n$), а вся совокупность

– матрицей прецедентов W (N, n). Прецеденты образуют в данном пространстве некоторое число компактных областей (классов) R_k ($k=1, \dots, K$).

Задачей анализа является выделение локальных областей классов прецедентов. Это достигается путем классификации прецедентов на базе ансамблей моделей алгоритмов идентификации. Алгоритм классификации реализует минимизацию функционала:

$$G(z_1, \dots, z_M) = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^K \sum_{a \in r_j} \|a - z_j^*\|^2 \rightarrow \min, \quad (17)$$

где N_j – число прецедентов в множестве r_j ; K – число областей (классов); z_j^* – среднее значение множества (центр класса).

Таким образом, особенности развития эволюционной динамики ПО позволяют рассматривать задачу интерпретации как открытую самоорганизующуюся динамическую систему.

Заключение

Разработанные концептуальные решения и методы построения функций интерпретации поведения ПО в непрерывно изменяющейся нестационарной динамической среде, обеспечивают

построение и использование моделей взаимодействия в рамках парадигмы СТК, предполагающей реализацию моделей нестационарной динамики ПО в режиме УС.

На основе разработанных концептуальных решений сформируем стратегию выбора интерпретирующей модели эволюционной динамики ПО в нестационарной среде.

1. При незначительной неопределенности формирование функции интерпретации математического описания ведется с использованием стандартных моделей нестационарной динамики ПО в функциональных пространствах СТК.

2. При значительной неопределенности используются функции интерпретации модифицированных моделей в функциональных пространствах СТК, анализ которых выполняется рамках концепции «климатического спектра».

3. В условиях полной неопределенности начальных условий задачи функция интерпретация нестационарной динамики ПО осуществляется на основе методов решения обратных задач А.Н.Тихонова [5] и метода функционала действия [2],[3].

Литература

1. Барсегян А.А., Куприянов М.С. Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. – Санкт-Петербург. БХВ-Петербург, 2004. – 336 с
2. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
3. Нечаев Ю.И. Топология нелинейных нестационарных систем; теория и приложения. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. – 325 с.
4. Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2018. – 384 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. – 285 с.
6. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>.
7. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. №3, p.p.77–84.

References

1. Barsegyan A.A., Kuprianov M.S., Stepanenko V.V., Holod I.I. Metody i modeli analiza dannykh [Methods and models of data analysis: OLAP and Data Mining]. – St.-Petersburg. B XV-Perersbirg, 2004. – 336 p.
2. Nechaev Yu.I. Teoriya katastrof: sovremenny podvhpd pri prinatii resheny [Catastrophe theory: modern approach for decision making]. – St.-Petersburg: Art-Xpress, 2011.– 392 p.
3. Nechaev Yu.I. Topologiya nelineinykh nestacionarnykh system: teoriya i prilozhenia [Topology of non-linear agd non-stationary systems: theory and application]. – St.-Petersburg: Art-Xpress, 2015. – 325 с.
4. Nechaev Yu.I. Sovremenny problemy informatiki i vychaslitelnoy techniki [Modern problems of the infotmatic and computertechncis]. – St.-Petersnurg: Art-Xpress. 2018. – 384 p.
5. Tichonov A.N., Arsenin V Ja. Metody reshenia nekorrektnykh sadach [Mathods of decision of the un-correct tasks. M.: Sciebce, 1986. – 285 p.
6. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>.
7. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ACM-1994. Vol.37. №3, p.p.77–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Иванович Нечаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Yuri I. Nechaev, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Дмитрий Владимирович Никущенко, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ndmitry@list.ru

Dmitry V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng), professor, vice-rector for research, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ndmitry@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.09.2021.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.02.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 11.03.2022.



**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 редколлекцией 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.

Редколлекция 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 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**