

4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)

1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100

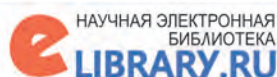
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 2 том 3 2021
№ 2 part 3 2021

Morskie intelektual'nye tehnologii



Труды
Санкт-Петербургского
государственного морского технического университета



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 3 2021 Сквозной номер 52

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.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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 включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Соответствие рубрик в научном журнале «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» номенклатуре научных специальностей ВАК, по которым присуждаются ученые степени

Шифр	Отрасль науки, группа специальностей	по которым присуждается ученая степень
05.08.00	Кораблестроение	
05.08.01	Теория корабля и строительная механика	Технические
05.08.03	Проектирование и конструкция судов	Технические
05.08.04	Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства	Технические, экономические
05.08.05	Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)	Технические
05.08.06	Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие	Технические, Физико-математические
05.13.00	Информатика, вычислительная техника и управление	
05.13.01	Системный анализ, управление и обработка информации	Технические, Физико-математические
05.13.06	Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)	Технические
05.13.10	Управление в социальных и экономических системах	Технические
05.13.11	Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей	Технические, Физико-математические
05.13.12	Системы автоматизации проектирования	Технические, Физико-математические
05.13.17	Теоретические основы информатики	Технические, Физико-математические
05.13.18	Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	Технические, Физико-математические

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», 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 3 2021 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).

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:

- Ship Building,
- Theory of Ship and Structures,
- Ship Designing and Structure,
- Technology of Ship Building,
- Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction); Information Science,
- Computer Engineering and Control System Analysis,
- Control and Processing of Information,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Control in Social and Economic Systems,
- Software for Computers,
- Complexes and Computer Networks,
- Designing Automation Systems,
- Foundations of Information Science,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures and Software Systems.

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, 2021



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 РАН, 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

Члены Редколлегии

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Р.В. Борисов д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

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

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

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

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

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

В.В. Родионов, к.т.н, с.н.с., ЗАО «Си Проект», Санкт-Петербург

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ», Санкт-Петербург

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., исполнительный 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

С.П. Столяров, к.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, 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, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

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

P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

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

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

Yu.A. Vlasov, Cand. Sci. (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

A.N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

V.A. Evteev, Dr. Sci. (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia

F.F. Legusha, Dr. Sci. (Phys. & Math.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russia

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

V.V. Rodionov, Cand. Sci. (Eng), Senior Research Scientist, CJSC "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

A.I. Gajkovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies", St. Petersburg, Russia

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

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), Executive Director, 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

S.P. Stoljarov, Cand. Sci. (Eng), Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, 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
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Яковлевич Фершалов**, доктор технических наук, Дальневосточный Федеральный Университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, ЦКБ "Айсберг"
- **Кирилл Всеволодович Рождественский**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Ростиславовна Счисляева**, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Александр Олегович Токарев**, доктор технических наук, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Андрей Николаевич Печников**, доктор технических наук, профессор, НИИ «Центрпрограммсистем»
- **Валерий Александрович Пятакович**, к.т.н., доцент, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Васильевич Гаврилов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Александр Аркадьевич Исаев**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
- **Валерий Феодосиевич Белей**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Виктор Карлович Румб**, кандидат технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко» Российской академии наук
- **Михайлов Владимир Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, Концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор»

- **Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Виктор Иванович Гнатюк**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Георгиевич Чулкин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Станислав Альбинович Скоморовский**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Игорь Иванович Туркин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Олег Валентинович Хруцкий**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Валентин Илдарович Халиулин**, доктор технических наук, профессор, Центр композитных технологий КНИТУ-КАИ

**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,
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Yuriy Ya. Fershalov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Boris P. Ionov**, Dr. Sci. (Eng), Central Design Bureau "Iceberg"
- **Kirill V. Rozhdestvenskij**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir V. Gavrilov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Elena R. Schislaeva**, Dr.Sci.(Econ), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Ivan B. Druz**, Dr.Sci.(Eng), professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Alexander O. Tokarev**, Dr.Sci.(Eng), Siberian State University of Water Transport
- **Andrei N. Pechnikov**, Dr.Sci.(Eng), professor, Research Institute «CENTERPROGRAMSYSTEM»
- **Valeriy A. Pyatakovich**, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Alexander A. Isaev**, Dr. Sci. (Econ), Ph.D. (Eng.), Vladivostok state university of economics and service
- **Valeriy F. Beley**, Dr.Sci. (Eng), professor, Kaliningrad State Technical University
- **Victor K. Rumb**, Ph.D.(Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Tarantsev**, Ph.D.(Eng.), professor, Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
- **Vladimir A. Mihajlov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Concern "Sea Underwater Weapon - Hidropribor"
- **Michael V. Voyloshnikov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Victor I. Gnatyuk**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad state technical university
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Jurij P. Potechin**, Associate Professor, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei G. Chulkin**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

- **Stanislav A. Skomorovskij**, Associate Professor, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Igor I. Turkin**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Oleg V. Chruckijj**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Valentin I. KHaliulin**, Dr.Sci.(Eng), professor, Center of Composite Technology, KNRTU-KAI



ТРУДЫ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Сверчков А.В., Крыжевич Г.Б., Правдин А.Ю. Экспериментальное исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на ходовые качества волнорассекающего катамарана.....	13
Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории.....	20
Семенова В.Ю., Павлючук Н.А. Исследование нелинейных статических перемещений, возникающих при качке судна в различных стесненных фарватерах.....	28
Семенова В.Ю., Баканов К.И. Определение возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик при совместной качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке.....	37
Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил Регистра Судоходства в части ограничений слеминга и оголения винта.....	48
Каунг Мьят Сое Влияние толщины профиля на грузоподъемность быстроходного судна с аэродинамической разгрузкой.....	53
Рождественский К.В., Зин Мин Хтет К оценке индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) судна с энергосберегающими крыльевыми устройствами.....	58

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Алексеев А.В. Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры.....	69
Апалько Т.А., Най Мьо Хлаинг Исследование математической модели проектирования барже-буксирного комплекса для Республики Союза Мьянма.....	82

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Минасян М.А., Минасян А.М., Цзэн Цзюньцзе Методика экспериментальной оценки коэффициента эффективности вибрационной защиты канатностержневой муфты «tamsag+a» дизель-генераторного агрегата ДГА-8,83.....	88
Минасян М.А., Цзэн Цзюньцзе, Минасян А.М. Методика расчета муфты «tamsag+a» с канатностержневыми элементами.....	96
Левенталь М.Ю., Погодин Ю.М., Миронов Ю.Р. Расчетное определение потерь в турбинных решетках профилей.....	104

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Численное моделирование электромагнитного поля, индуцированного колебательным движением заряженного шара.....	110
Мартынов В. Л., Сиек Ю. Л., Борисов А. Н. Методика практического расчета телевизионных коммуникаций подводных аппаратов.....	117
Ильменков С.Л., Богородский А.В., Лебедев Г.А., Троицкий А.В. Использование интеграла Кирхгофа для приближенного расчета угловых характеристик рассеяния звука упругими оболочками неаналитической формы.....	124

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Лесных К.А., Никонов С.А., Островская Н.В. Особенности расчета динамических задач с трением с помощью пакета «ADAMS».....	130
Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Математическое моделирование распространения усталостных трещин и оценка ресурса алюминиевых конструкций с прорезным сварным швом.....	138
Нечаев Ю. И., Петров О. Н. Гибридное моделирование морских объектов в «потенциальной яме».....	145

CONTENTS	page
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Andrey V. Sverchkov, Gennady B. Kryzhevich, Andrian Ju. Pravdin Experimental investigation of structural and operational factor effects on speed performance of wave cleaving catamarans.....	13
Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev The Determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory.....	20
Viktoriya Yu. Semenova, Nikita A. Pavlyuchuk Investigation of nonlinear static displacements during the ship's motions in various confined waterways.....	28
Viktoriya Yu. Semenova, Kirill I. Bakanov Determination of exciting forces and amplitude-frequency characteristics during coupled motions of two ships in shallow water parallel to the vertical wall.....	37
Rudol'f V. Borisov, Aleksandr A. Luzyanin On the development of the draft requirements of the rules of the Register of Shipping in terms of restrictions on sleaming and exposing the screw.....	48
Kaung Myat Soe Effect of airfoil thickness on cargo carrying capacity for high speed ship with aerodynamic unloading.....	53
Kirill V. Rozhdestvensky., Zin Min Htet To estimation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for a ship with energy-saving wing devices.....	58
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Anatoly V. Alekseev Examples of implementation of a multi-model qualimetric method for system optimization of marine engineering and marine infrastructure facilities.....	69
Tatyana A. Apalko, Nay Myo Hlaing Research of a mathematical model for designing a barge-towing complex for the Republic of the Union of Myanmar.....	82
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Junjie Zeng Method of experimental evaluation of the efficiency coefficient of vibration protection of the rope-rod coupling "mamsar+a" of the diesel generator set DGA-8.83.....	88
Minas A. Minasyan, Junjie Zeng, Armen M. Minasyan Method for calculating the «mamsar+a» coupling with rope-core elements.....	96
Mikhail Yu. Levental, Yuriy M. Pogodin, Yuriy R. Mironov Calculated estimation of energy losses in axial turbine cascades.....	104
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovsky Numerical simulation of the electromagnetic field induced by the oscillatory motion of a charged ball.....	110
Viktor L. Martynov, Yuriy L. Siek, Aleksandr N. Borisov Method of practical calculation of underwater vehicle's television communications.....	117
Sergey L. Ilmenkov, Alexey V. Bogorodskiy, German A. Lebedev, Alexey V. Troitskiy Using the Kirchhoff integral for approximate calculation of angular characteristics of sound scattering by elastic shells of nonanalytical form.....	124
MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS	
Kir A. Lesnyh, Semyon A. Nikonov, Nadezda V. Ostrovskaya Features of dynamic problems with friction calculation by means of an «ADAMS» package.....	130
Gennady B. Kryzhevich, Anton R. Filatov Mathematical modeling of the fatigue cracks propagation and fatigue life estimation of aluminum structures with slot welds.....	138
Yuri I. Nechaev, Oleg N. Petrov Hybrid modeling of the marine objects in the «potential well».....	145

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5:532.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.029>

Экспериментальное исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на ходовые качества волнорассекающего катамарана

А.В. Сверчков¹ e-mail: ksri@mail.ru, Г.Б. Крыжевич^{1, 2} e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru,
А.Ю. Правдин³ e-mail: ap@unicont.com

¹Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург,

²Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург,

³НПК Морсвязьавтоматика, Санкт-Петербург

Аннотация. В статье приводятся результаты экспериментального исследования влияния конструктивных факторов на ходовые качества перспективного волнорассекающего пассажирского катамарана. Цель работы – поиск принципиальных технических решений по облику катамарана, обеспечивающих повышенные ходовые качества на тихой воде, в условиях волнения и экономическую эффективность. Оценено влияние скорости хода на ходовую посадку, гидродинамическое сопротивление, буксировочную и потребную мощность волнорассекающего катамарана. Выявлена эффективность применения транцевого интерцептора на волнорассекающем катамаране. Обсуждается рациональный выбор перемещения (выдвиг) транцевого интерцептора при заданных значениях водоизмещения и эксплуатационной скорости. Выявлена целесообразность перехода от двулапых кронштейнов гребных валов к однолапым. Определено изменение потребной мощности при переходе от двулапого кронштейна к однолапому. Дана количественная оценка влияния выступающих частей (рулей и кронштейнов) на буксировочное сопротивление модели. Оценено взаимное влияние выдвиг интерцептора и угла статического дифферента на характеристики ходкости при движении катамарана со скоростью экономического хода и эксплуатационной скоростью. Выявлена зависимость дополнительного буксировочного сопротивления модели на волнении от формы соединительного моста катамарана. Результаты исследований использованы при проектировании современного экологичного пассажирского катамарана проекта «Ecoscruiser».

Ключевые слова: суда многокорпусные, катамараны, ходкость судов, испытания модели в опытовом бассейне, интерцептор, кронштейны гребных винтов.

Experimental investigation of structural and operational factor effects on speed performance of wave cleaving catamarans

Andrey V. Sverchkov¹ e-mail: ksri@mail.ru, Gennady B. Kryzhevich² e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru,
Andrian Ju. Pravdin³ e-mail: ap@unicont.com

¹Krylov State Research Centre, Russian Federation, ²Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation, ³NPK Morsvyazavtomatika, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper presents results of experimental study of structural factor effects on speed performance of a promising wave-cleaving passenger catamaran. The work purpose consists in searching for basic engineering solutions on the catamaran appearance that provide increased speed performance in still water and in seas, as well as economical efficiency. Effects of travel speed on operating trim, flow resistance, towrope power and power requirements of a wave-cleaving catamaran are evaluated. Effectiveness of using a transom interceptor in a wave-cleaving catamaran was identified. Rational selection of transom interceptor movement (advance) at specified displacement and operational speed values are discussed. Expedience of transition from two-leg propeller struts to single-leg ones is shown. Change of the power requirements at transition from two-leg propeller struts to single-leg ones is evaluated. Effects of projecting parts (rudders and propeller struts) on the model towrope resistance are evaluated quantitatively. Mutual effects of interceptor advance and static trim angle on the propulsion qualities under catamaran operation at economical and service speeds are evaluated. Dependence of the model additional towrope resistance in seas on the catamaran cross-deck structure shape are derived. The investigation results were used for design of a state-of-art ecological passenger catamaran “Ecoscruiser”.

Key words: multi-hulled vessels, catamarans, vessel propulsion qualities, model tests in towing tank, interceptor, propeller struts.

1. Объект исследования и цель работы

По сравнению с однокорпусными судами катамараны обладают большей пассажировместимостью, меньшей осадкой, более высокой скоростью, остойчивостью и безопасностью. Современные катамараны позволяют быстро и в широком диапазоне погодных условий осуществлять коммерческие перевозки пассажиров и грузов как в прибрежной и межостровной зонах,

так и между крупными морскими портами. Для таких перевозок целесообразно создавать суда с высокими ходовыми качествами и комфортабельностью, наличие которых обеспечивает высокую прибыль при эксплуатации [1, 2]. На создании пассажирских катамаранов с электродвижением специализируется ООО «НПК Морсвязьавтоматика», разрабатывающее судно проекта «Ecoscruiser», проектные решения для которого обсуждается в настоящей работе. Катамаран имеет следующие

основные характеристики: водоизмещение – 62 тонны, количество пассажиров – 120 человек, экипаж – 3 человека, длина по КВЛ – 29,8 м, эксплуатационная скорость 20 узлов. В качестве движителя на судне применены гребные винты фиксированного шага, установленные на наклонных валах. Внешний вид судна представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид пассажирского катамарана с электродвижением проекта «Ecocruiser»

Использование электродвижения создает новый уровень комфортабельности для пассажиров: низкий уровень шума и вибрации, отсутствие дизельного выхлопа в салоне и на открытой палубе. Кроме того, обеспечиваются экологичность среды в зоне эксплуатации судна и его экономическая эффективность. В отличие от концептуальных проектов, на которых только еще отрабатываются основные принципы электродвижения [3], проект «Ecocruiser» является первым серийным полностью электрическим судном, на котором успешно применяются многие инновационные технологии.

Одним из средств повышения комфортабельности подобных транспортных средств является использование волнорассекающих форм носовых оконечностей корпусов [1, 2] (рис. 1 и 2), позволяющих снизить силы, возникающие при взаимодействии их с волнами и возбуждающие качку. Помимо того, снижение этих сил позволяет уменьшить и силы сопротивления воды движению катамарана в условиях волнения. По существу, выбор такой формы носа представляет собой реализацию технологии X-Vow, получившую в последние десятилетия применение при строительстве ряда судов.

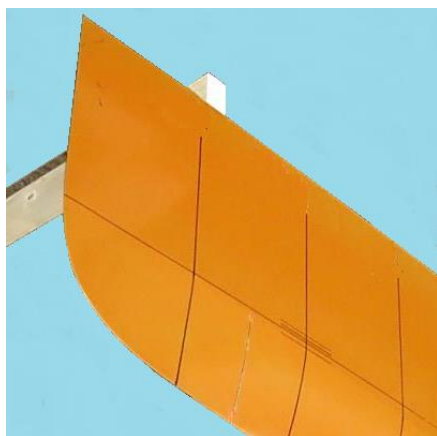


Рис. 2. Форма волнорассекающей носовой оконечности корпуса катамарана «Ecocruiser»

Основные элементы обводов корпусов катамарана «Ecocruiser» были отработаны в результате выполнения CFD-расчетов. В частности,

были подобраны: наиболее оптимальное удлинение корпусов, заострение ватерлинии, заглубление транца, радиусы скулы, угол подъема кормовых ветвей батоксов, а также ряд других элементов корпуса, обеспечивающих минимальное волновое сопротивление.

Несмотря на тщательную расчетную оптимизацию обводов корпусов, оценка ходовых качеств катамарана выявила необходимость применения дополнительных мероприятий по снижению буксировочного сопротивления, эффективность которых можно оценить только в результате проведения модельного эксперимента.

Поэтому целью работы стала не только экспериментальная проверка результатов CFD-расчетов, но и определение эффективности традиционных и поиск новых технических решений, обеспечивающих повышенные ходовые качества волнорассекающего катамарана на тихой воде и в условиях волнения. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- оценка эффективности применения транцевого интерцептора, влияния угла статического дифферента, а также взаимного влияния выдвига транцевого интерцептора и угла статического дифферента при движении катамарана на экономической (8 уз) и эксплуатационной скорости (20 уз);
- оценка эффективности перехода от традиционных двулапых кронштейнов гребных валов к однолапым и определение надбавок на выступающие части (ВЧ) при использовании двух вариантов кронштейнов;
- выявление возможности снижения дополнительного сопротивления воды движению модели в условиях волнения за счет снижения вертикального клиренса соединительного моста в кормовой его части.

2. Буксировочные испытания модели катамарана

Масштаб буксировочной модели (рис. 3), испытанной в опытовом бассейне Крыловского центра, по отношению к натурному судну составляет 1:7. Длина модели 4,26 м, ширина 1,23 м, ширина одного корпуса 0,22 м. Эксплуатационная скорость, соответствующая 20 уз, 3,9 м/с (число Фруда $Fr=0,602$), скорость экономического хода, соответствующая 8 уз, 1,6 м/с ($Fr=0,241$).



Рис. 3. Фотография модели катамарана без выступающих частей с установленными на транцах корпусов интерцепторами

На транце каждого корпуса (рис. 4) по всей его ширине смонтирован регулируемый интерцептор с возможностью изменения выдвига от 0 до 10 мм.

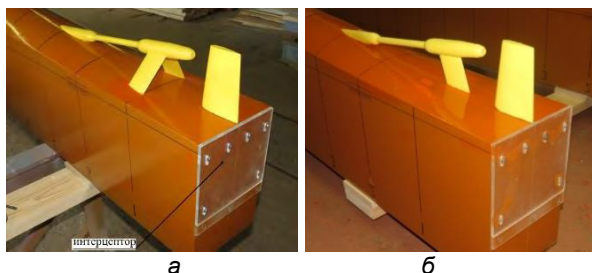


Рис. 4. Фотографии кормовой части модели с установленными ВЧ – пером руля и кронштейнами: а – двулапым, б – однолапым

Транцевый интерцептор представляет собой прикрепленную к транцу пластину, нижний край которой опускается ниже уровня днища, расположенного перед транцем. При движении судна перед интерцептором формируется область повышенного давления, которая приподнимает кормовую часть корпуса, уменьшая ходовой дифферент на корму.

Во время буксировочных испытаний в опытовом бассейне измерялись следующие величины: скорость движения буксировочной тележки V_M ; сопротивление модели R_{TM} ; дифферент ψ ; всплытие/погружение модели ΔT .

Испытания модели проводились в три последовательных этапа. На первом этапе испытывался «голый» корпус в положении на ровный киль без выдвига интерцептора. Модель была испытана в диапазоне скоростей от 0,6 до 6,8 м/с (числа Фруда 0,09-1,05), что соответствует скоростям натурального судна от 3 до 35 уз.

Затем на модель были установлены выступающие части (ВЧ): два руля, два наклонных гребных вала со ступицами и обтекателями гребных винтов (рис. 4а). Опорой валам служили двулапые кронштейны. Для этого варианта определялась надбавка на ВЧ, проверялась эффективность применения транцевого интерцептора.

После окончания второго этапа испытаний двулапые кронштейны были заменены на однолапые (рис. 4б). В результате проведения буксировочных испытаний была определена надбавка на новый вариант ВЧ. Выбран оптимальный выдвиг интерцептора при положении корпуса на ровный киль. Для эксплуатационной скорости проверялось влияние статического дифферента на величину буксировочного сопротивления при сохранении оптимального выдвига интерцептора. Диапазон углов статического дифферента был назначен от $-1,5^\circ$ (на нос) до $+1,5^\circ$ (на корму) с шагом $0,5^\circ$. Изменение дифферента осуществлялось переносом балластировочных гирь по длине корпуса, не меняя водоизмещение модели.

В завершающей стадии этих испытаний для двух скоростей, соответствующих 8 и 20 узлам, был выполнен довольно трудоемкий эксперимент, в котором одновременно варьировался выдвиг интерцептора в диапазоне от 0 до 4 мм с шагом 1 мм (от 0 до 28 мм с шагом 7 мм в масштабе натурального судна) и угол статического дифферента от 0 до $1,5^\circ$ на корму с шагом $0,5^\circ$. Дифферент на нос не

рассматривался, поскольку он приводит к увеличению сопротивления на скорости 20 уз и к оголению транца на скорости 8 уз.

При скорости модели, соответствующей эксплуатационной 20 уз, эксперимент выявил значительное влияние выдвига интерцептора на буксировочное сопротивление модели R_{TM} , которое отражено на рис. 5. Оптимальным является выдвиг 2 мм (14 мм в масштабе натурального судна).

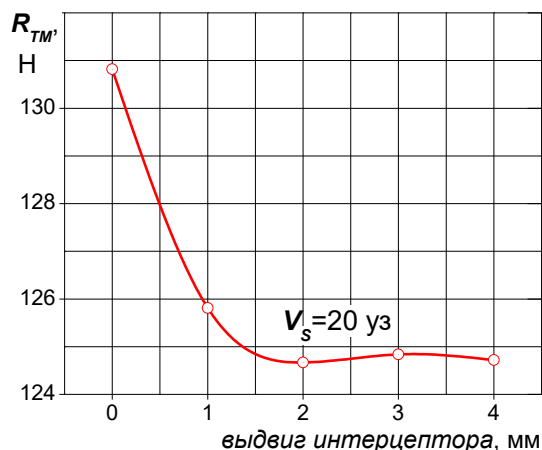


Рис. 5. Буксировочное сопротивление R_{TM} модели катамарана с двулапыми кронштейнами в зависимости от выдвига интерцептора

На рис. 6 показано влияние угла статического дифферента на буксировочное сопротивление модели катамарана при скорости, соответствующей эксплуатационной $V_s=20$ уз при выдвиге интерцептора 2 мм (14 мм). Оптимальные значения такого угла лежат в диапазоне от $0,7$ до $1,0$ градуса.

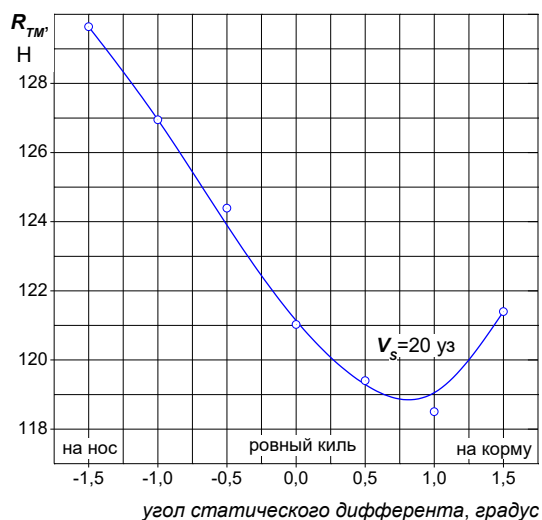
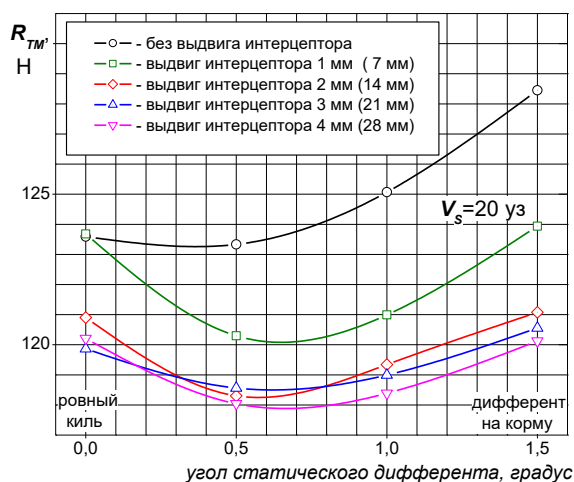


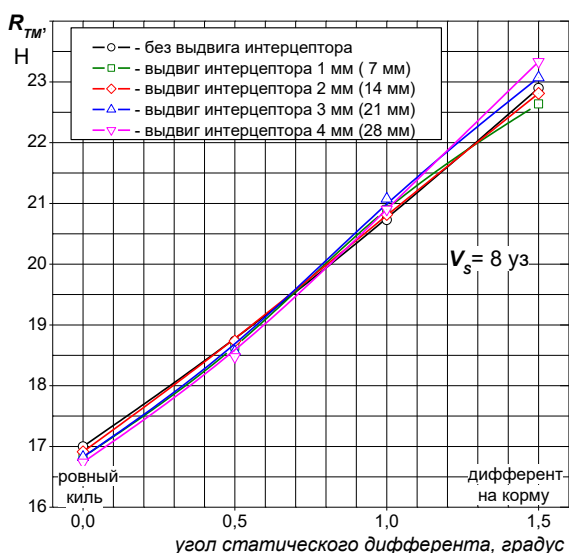
Рис. 6. Буксировочное сопротивление модели катамарана R_{TM} в зависимости от угла статического дифферента. Однолапые кронштейны

Результаты испытаний, в которых одновременно варьировался выдвиг интерцептора и угол статического дифферента приведены на рис. 7. Согласно полученным данным для скорости 20 узлов (рис. 7а) лучшим можно признать сочетание выдвига интерцептора 2 мм (14 мм в натурном масштабе) и угла статического дифферента $0,5$ градуса на корму.

На скорости 8 уз (рис. 7б) выдвиг интерцептора практически не оказывает влияния на величину буксировочного сопротивления, а дифферент на корму влияет негативно. Причем рост сопротивления на 8 узлах зависит линейно от величины статического дифферента.



а



б

Рис. 7. Буксировочное сопротивление $R_{ТМ}$ при различных выдвиге интерцептора в зависимости от угла статического дифферента при двух скоростях модели: а - 3,9 м/с ($V_s=20$ уз); б - 1,6 м/с ($V_s=8$ уз)

На рис. 8 приведена фотография модели катамарана проекта «Ecoscruiser», сделанная во время проведения буксировочных испытаний на скорости, соответствующей 20 уз. Выдвиг интерцептора 2 мм (14 мм), дифферент на корму $0,5^\circ$. Малое волнообразование на приведенной фотографии (несмотря на то, что скорость 20 уз ($Fr=0,602$) находится вблизи «горба» буксировочного сопротивления) демонстрирует, насколько удачно выбраны обводы корпуса.

В результате пересчета буксировочных испытаний модели получены данные по потребляемой мощности натурального катамарана. При пересчете буксировочного сопротивления модели на натурное

судно использовался способ, основанный на схеме Фруда и допущении, что коэффициенты остаточного сопротивления модели и натурального судна равны [5]. Согласно ей измеренное в результате буксировочных испытаний полное сопротивление модели $R_{ТМ}$ разделялось на две составляющие: сопротивление трения $R_{ФМ}$ и остаточное сопротивление R_{RM} . При этом коэффициент полного сопротивления модели представлялся в виде суммы коэффициента остаточного сопротивления и коэффициента сопротивления трения эквивалентной гладкой пластины, вычислявшегося по формуле Прадтля-Шлихтинга.



Рис. 8. Фотография модели катамарана, сделанная во время испытаний на тихой воде

Влияние взаимодействия таких факторов эксперимента как выдвиг интерцептора и число лап в каждом из кронштейнов гребного вала на потребляемую мощность катамарана P_s можно оценить по данным, приведенным на рис. 9.

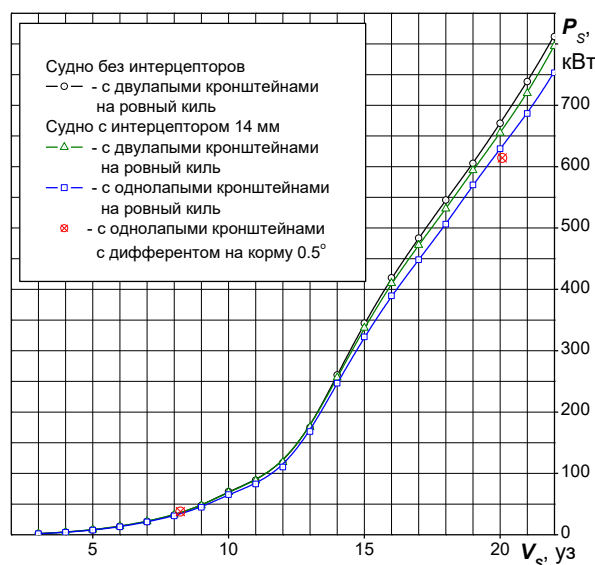


Рис. 9. Потребная мощность катамарана P_s в зависимости от скорости V_s при двух вариантах кронштейнов, различных значениях выдвиге интерцептора и угла статического дифферента

Результаты пересчета буксировочного сопротивления показывают, что при эксплуатационной скорости применение транцевого интерцептора позволяет уменьшить потребляемую мощность с 670,7 до 655,0 кВт, т.е. на 15,7 кВт. Замена двулапых кронштейнов на однолапые снижает потребляемую мощность еще на 25,8 кВт до 629,2 кВт. Придание судну статического дифферента

0,5° на корму позволяет получить дополнительный выигрыш 15 кВт, уменьшив потребную мощность до 614,2 кВт. В сумме применение всех мероприятий позволяет снизить потребную мощность при эксплуатационной скорости на 56,5 кВт или на 8,4% по сравнению с первоначальным вариантом.

Достаточно плавная зависимость буксировочной мощности катамарана от скорости хода (рис. 9) без явно выраженного «горба» буксировочного сопротивления (на скоростях от 12 до 18 узлов) обусловлена с конструктивными особенностями судна – большим удлинением корпусов, оптимальным заглублением транца и волнорассекающей формой носовых оконечностей.

Кроме того, полученные в работе данные по влиянию статического дифферента на величину потребной мощности позволяют оценить изменение энергозатрат в случае перемещения пассажиров по длине судна.

3. Испытания модели катамарана в мореходном бассейне

Для более радикального снижения интенсивности качки катамаранов, повышения их комфортабельности, а также для уменьшения дополнительного сопротивления воды движению катамарана на волнении вертикальное расстояние от нижней поверхности соединительного моста до уровня плоскости ватерлинии (вертикальный клиренс) может выполняться переменным, с постепенным уменьшением к кормовой оконечности (рис. 10). Такая конструктивная мера позволяет существенно увеличить гидродинамическое сопротивление продольной качке в условиях интенсивного волнения и снизить дополнительное сопротивление воды движению судна на морском волнении.

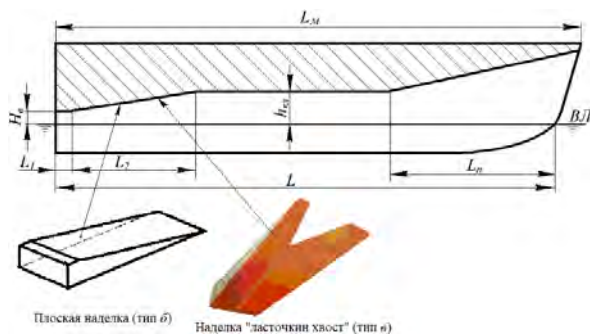


Рис. 10. Схема продольного сечения катамарана, имеющего переменный по длине вертикальный клиренс

Для проверки этого предположения испытана модель катамарана на регулярном волнении. В носовой части модели наружная поверхность соединительного моста выполнена со значительным наклоном по отношению к плоскости конструктивной ватерлинии (формируется «подъем» моста), простирающимся в корму до 5 теоретического шпангоута. В средней части судна (от 5 до 15 теоретических шпангоутов) наружная поверхность соединительного моста имеет незначительный наклон. Вертикальный клиренс $h_{кл}$ в этой части составляет около 7% от длины модели между перпендикулярами L . В кормовой части катамарана,

начиная с 15 теоретического шпангоутов, происходит дальнейшее существенное уменьшение вертикального клиренса (по сравнению со средней и носовой частями) до величины H_6 , составляющей 30% от клиренса $h_{кл}$. В части катамарана, примыкающей к кормовому перпендикуляру (к транцу), участка моста выполнен без наклона (рис. 10) на длине равной 4% от длины модели между перпендикулярами.

Для экспериментальной проверки эффективности снижения внешних силовых воздействий с помощью уменьшения вертикального клиренса в кормовой оконечности катамарана в мореходном бассейне Крыловского центра выполнены испытания параметрической модели катамарана на встречном регулярном волнении (рис. 11).



Рис. 11. Испытания модели катамарана в мореходном бассейне

В первом варианте исполнения вертикальный клиренс модели был переменным только в носовой оконечности судна. После проведения испытаний этого варианта модели на кормовую часть ее соединительного моста последовательно устанавливались два варианта наделок (рис. 10) с различной конфигурацией поперечных сечений, обеспечивавших снижение клиренса в кормовой оконечности модели и формирование или плоских участков внешней поверхности моста в соответствии (тип «б») или сводчатой поверхности моста (в форме ласточкиного хвоста, тип «в»). Результаты испытаний показали, что наличие на модели любого варианта наделки относительно слабо влияет на вертикальные ускорения носовой оконечности. Сильное влияние наделки оказывают на:

- амплитуды вертикальной качки;
- вертикальные ускорения в средней части судна и в кормовой оконечности;
- дополнительное сопротивление воды движению судна на волнении.

Влияние типа наделки, установленной в кормовой части моста, на дополнительное сопротивление воды движению модели отражено зависимостями, приведенными на рис. 12. Полученные экспериментальные данные о величинах ускорений, параметрах качки и дополнительном сопротивлении воды движению катамарана на регулярном волнении показывают, что использование любой наделки из обследованных типов в кормовой части соединительного моста может дать существенный технический и экономический эффект при эксплуатации катамаранов в морских условиях. В частности, при ходе катамарана со скоростью, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,56$, на развитом

волнении с достаточно большим средним периодом волнения T_v ($5,5 \leq T_v / \sqrt{L_{pp}/g} \leq 6,5$), благодаря уменьшению клиренса в кормовой части судна достигается снижение амплитуд вертикальной качки, максимальных ускорений в центре тяжести модели и дополнительного буксировочного сопротивления, вызванного волнением, приведенное в таблице 1.

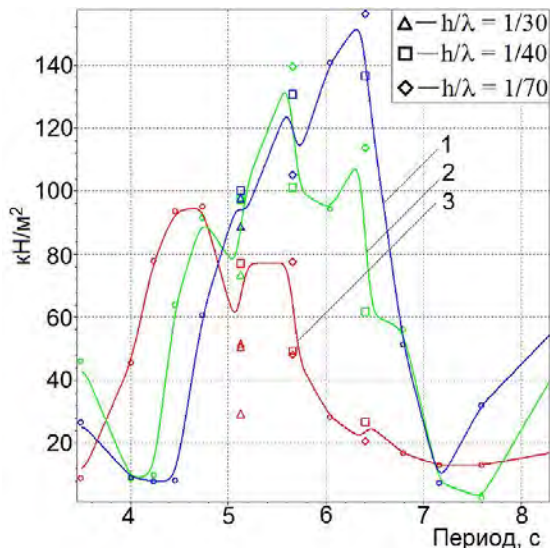


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика дополнительного сопротивления модели на волнении при разных отношениях высоты волны h к длине λ : 1 – модель без наделки, 2 – наделка типа «в», 3 – наделка типа «б»

Результаты испытаний показали, что наличие на модели любого варианта наделки относительно слабо влияет на вертикальные ускорения носовой оконечности. Сильное влияние наделки оказывают на:

- амплитуды вертикальной качки;
- вертикальные ускорения в средней части судна и в кормовой оконечности;
- дополнительное сопротивление воды движению судна на волнении.

Как следует из данных, приведенных в таблице, в указанном диапазоне T_v применение на катамаранах наделки типа «б» (прямоугольной формы в плане) предпочтительно по сравнению с наделкой типа «в». Вместе с тем при малых значениях T_v (при коротких длинах волн) более эффективной оказывается наделка типа «в».

Литература

1. Крыжевич Г.Б., Правдин А.Ю. Концепция малого пассажирского катамарана с электродвижением. Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный вып. 1, СПб, 2020. С. 82-88.
2. Крыжевич Г.Б., Правдин А.Ю. Способы и средства улучшения мореходности, комфортабельности и снижения материалоемкости пассажирского катамарана. Труды Крыловского государственного научного центра. Т. 1, № 395. 2020. С. 53-62.
3. Project no: 234124, "Battery powered Boats, providing Greening, Resistance reduction, Electric, Efficient and Novelty". Acronym: BB GREEN Instrument: Collaborative project Topic: SST 2008.5.2.1. Innovative product concepts. Call identifier: FP7-SST-2008-RTD-1D1.7. Final Report Date: 2015-07-10. Coordinator name: SES Europe AS. 92 p.
4. Couser, P., Molland, A. F., Armstrong, N. and Utamz, I. K. Calm Water Powering Prediction for High-Speed Catamarans," Fast'97, Fourth International Conference on Fast Sea Transportation, Sydney, Vol. 2, 1997, pp. 765-774.

Таблица 1

Снижение (в процентах) параметров качки и дополнительного сопротивления воды движению катамарана при уменьшении клиренса в кормовой оконечности по сравнению с судном, имеющим постоянный клиренс в средней и кормовой частях

Анализируемый параметр	Тип наделки на кормовой части модели	
	Тип «б»	Тип «в»
Амплитуды вертикальной качки	15	8
Наибольшие вертикальные ускорения в центре тяжести	28	18
Дополнительное сопротивление на волнении ΔR	70	29

Следует однако отметить, что при малой интенсивности волнения и малых значениях среднего периода волнения, исключая появление резонансных режимов качки (при $T_v / \sqrt{L_{pp}/g} \leq 4,0$), технические и экономические показатели эффективности использования наделок не велики. С учетом этого обстоятельства применение снижения клиренса в кормовой оконечности следует рекомендовать преимущественно для морских катамаранов, эксплуатирующихся на интенсивном волнении.

Заключение

В результате проведенных буксировочных испытаний модели получены данные по буксировочному сопротивлению и буксировочной мощности волнорассекающего катамарана.

Получены результаты анализа влияния на посадку катамарана, сопротивление воды его движению и мощность движительного комплекса:

- наличия транцевого интерцептора и его положения (выдвиг);
- перехода от двулапых кронштейнов гребных валов к однолапым с определением надбавок на выступающие части при использовании двух вариантов кронштейнов;
- совместного воздействия выдвиг интерцептора и угла статического дифферента при движении катамарана со скоростью экономического хода и эксплуатационной скоростью;
- снижения вертикального клиренса соединительного моста в кормовой его части, дающего положительный эффект в условиях волнения.

5. Каневский Г.И. Прогнозирование ходовых качеств морских судов и кораблей по результатам испытаний их моделей в опытовом бассейне: Учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский Гос. морской технический университет, 2006, 83 с.

References

1. Kryzhevich G.B., Pravdin A..Ju. Kontseptsia malogo passagirskogo catamarana s electrodvizheniem [Concept of an Electric Small Passenger Catamaran], Sb. trudov Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, Spetsialny vypusk 1 [Transactions of Krylov State Research Centre. Special Issue 1], St.Petersburg, 2020, pp. 82-88.
2. Kryzhevich G.B., Pravdin A..Ju. Sposoby i sredstva uluchsheniya morekhodnosti, komfortabelnosti i snizheniya materialoemkosti passazhirskogo catamarana [Methods and Means for Passenger Catamaran Seakeeping Capacity and Comfort Improvement and Material Consumption Decrease], Sb. trudov Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Transactions of Krylov State Research Centre]. Vol.1, No.395, 2020, pp. 53-62.
3. Project No: 234124, Battery Powered Boats, Providing Greening, Resistance Reduction, Electric, Efficient and Novelty. Acronym: BB GREEN Instrument: Collaborative project Topic: SST 2008.5.2.1. Innovative product concepts. Call identifier: FP7-SST-2008-RTD-1D1.7. Final Report Date: 2015-07-10. Coordinator name: SES Europe AS.
4. Couser, P., Molland, A. F., Armstrong, N. and Utamz, I. K. Calm Water Powering Prediction for High-Speed Catamarans," Fast'97, Fourth International Conference on Fast Sea Transportation, Sydney, Vol. 2, 1997, pp. 765-774.
5. Kanevsky G.I. Prognozirovaniye khodovykh kachestv morskikh sudov i korablei po rezultatam ispytaniy ikh modeley v opytovom basseine [Prediction of Propulsion Qualities of Sea Vessels and Ships by Results of Testing Their Models in a Towing Tank]. Uchebnoye posobie [Educational Aid], St.Petersburg: St.Petersburg State Marine Technical University, 2006, 83 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владимирович Сверчков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник сектора Крыловский государственный научный центр, 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44, e-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>

Геннадий Брониславович Крыжевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Анриан Юрьевич Правдин, генеральный директор НПК Морсвязавтоматика, 192174, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кибальчича, д. 26Е, e-mail: ap@unicont.com.

Andrey V. Sverchkov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher, Head of Sector, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russian Federation, post code 196158, e-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>

Gennady B. Kryzhevich, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotmaskaya, 3, St. Petersburg, post code 1960121, Russian Federation, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Andrian Ju. Pravdin, Director General of NPK Morsvyazavtomatika, 26E, Kibalchicha str., St. Petersburg, post code 192174, Russian Federation, e-mail: ap@unicont.com.

Поступила в редакцию:

Принята к публикации:

УДК 629.12.073.243.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.030>

Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории

В.Ю. Семенова¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, Д.А. Альбаев¹ e-mail: albaevdaniil@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, 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 показана возможность расчета интегралов по свободной поверхности напрямую за счет их сходимости на бесконечном удалении от судна. Нелинейные дифракционные 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 дифракционных сил и моментов для четырех 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. Показана возможность расчета нелинейных дифракционных сил на произвольных курсовых углах.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, трехмерная потенциальная теория, потенциал второго порядка, функция Грина, нелинейные силы, дифракция.

The Determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory

Viktoriya Yu. Semenova¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, Danil A. Al'baev¹ e-mail: albaevdaniil@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the definition of nonlinear diffraction forces of the second order, 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 diffraction 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 diffraction forces and moments for four 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 . Good agreement of the results with each other is shown. The possibility of calculating nonlinear diffraction forces at arbitrary heading angles is shown.

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

Введение

Для расчета характеристик качки судна на регулярном волнении необходимо уметь определять линейные и нелинейные возмущающие силы и моменты, обусловленные действием волн. Линейные возмущающие силы определялись в многочисленных работах российских и зарубежных авторов и к настоящему времени являются полностью изученными. Нелинейная дифракционная задача второго порядка была решена в работах Куозука [6], Параниколао [7], Семеновой В.Ю. [1]. Во всех этих работах использовались двумерные методы и специальные подходы для определения несобственных интегралов по свободной поверхности. В работах Lee [8], Параниколао [9] дифракционная задача второго порядка решается в трехмерной постановке. Из-за применения ограниченного количества панелей при разбивке свободной поверхности, связанной с ограниченными возможностями компьютерной техники, авторами также применяются специальные приемы для

вычисления интегралов по свободной поверхности на большом удалении от объектов.

В предыдущих работах авторов [2], [3], [4] было рассмотрено определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных различными видами колебаний судна, что недостаточно для решения системы дифференциальных уравнений качки второго порядка и определения соответствующих амплитуд.

Поэтому, в настоящей статье проводится определение нелинейных дифракционных сил и моментов, обусловленных нелинейностью граничного условия на свободной поверхности жидкости.

Описание метода

Потенциал набегающего волнения первого порядка в случае бесконечно-глубокой жидкости записывается как:

$$\varphi_0^{(1)} = -i \frac{g}{\omega} a_{\omega_0} e^{vz + iv(x \cos \beta + y \sin \beta)}. \quad (1)$$

В случае жидкости ограниченной глубины:

$$\varphi_0^{(1)} = -i \frac{g}{\omega} a_{\omega_0} \frac{\text{ch}(\mu_0(z+H))}{\text{ch}(\mu_0 H)} e^{i\mu_0(x \cos \beta + y \sin \beta)}. \quad (2)$$

Данные потенциалы можно представить в виде суммы симметричной и несимметричной части:

$$\varphi_0^{(1)} = \varphi_{0S}^{(1)} + \varphi_{0A}^{(1)}, \quad (3)$$

где $\varphi_{0S}^{(1)} = -i \frac{g}{\omega} a_{\omega_0} e^{\nu z} \cos \nu(x \cos \beta + y \sin \beta)$ – симметричная часть $\varphi_0^{(1)}$ для бесконечно-глубокой жидкости относительно ДП в силу четности функции косинуса; $\varphi_{0A}^{(1)} = -i \frac{g}{\omega} a_{\omega_0} e^{\nu z} \cos \nu(x \cos \beta + y \sin \beta)$ – ассиметричная часть $\varphi_0^{(1)}$.

Потенциал дифрагированного волнения первого порядка может быть представлен аналогичным способом:

$$\varphi_7^{(1)} = \varphi_{7S}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)}, \quad (4)$$

Граничное условие в линейной постановке для определения $\varphi_7^{(1)}$:

$$\frac{d\varphi_{7S}^{(1)}}{dn} = -\frac{d\varphi_{0S}^{(1)}}{dn}; \quad \frac{d\varphi_{7A}^{(1)}}{dn} = -\frac{d\varphi_{0A}^{(1)}}{dn}. \quad (5)$$

Граничное условие на свободной поверхности второго порядка имеет вид:

$$\frac{\partial \Phi_{77}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \Phi_{77}^{(2)} = Q_{F77} = -\frac{i\omega}{g} (\nabla \Phi_{77}^{(1)})^2 + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{77}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right). \quad (6)$$

С учетом (3) и (4) $\Phi_{77}^{(1)}$ в уравнении (6) представляется как:

$$\Phi_{77}^{(1)} = \varphi_{0S}^{(1)} + \varphi_{0A}^{(1)} + \varphi_{7S}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)}. \quad (7)$$

Потенциал второго порядка можно представить аналогично потенциалу первого порядка в виде суперпозиции симметричной и ассиметричной частей.

$$\Phi_{77}^{(2)} = \varphi_{7S}^{(2)} + \varphi_{7A}^{(2)}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (7) в (6), можно получить граничные условия на свободной поверхности жидкости для симметричного потенциала и ассиметричного

$$\frac{\partial \varphi_{7S}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \varphi_{7S}^{(2)} = Q_{F77S} = -\frac{i\omega}{g} (\nabla \Phi_{7S}^{(1)})^2 - \frac{i\omega}{g} (\nabla \Phi_{7A}^{(1)})^2 + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{7S}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{7S}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{7S}^{(1)}}{\partial z} \right) + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{7A}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{7A}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{7A}^{(1)}}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi_{7A}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \varphi_{7A}^{(2)} = Q_{F77A} = -\frac{i\omega}{g} 2\nabla \Phi_{7S}^{(1)} \nabla \Phi_{7A}^{(1)} + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{7S}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{7A}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{7A}^{(1)}}{\partial z} \right) + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{7A}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{7S}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{7S}^{(1)}}{\partial z} \right) \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{7S}^{(1)} &= \varphi_{0S}^{(1)} + \varphi_{7S}^{(1)} \\ \varphi_{7A}^{(1)} &= \varphi_{0A}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)} \end{aligned}$$

Для определения потенциалов $\varphi_{7S}^{(2)}$, $\varphi_{7A}^{(2)}$ используется метод интегральных уравнений, согласно которому:

$$-\frac{1}{2} \varphi_{7S}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \varphi_{7S}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \quad (11)$$

$$= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F77S} G^{(2)} dS_F.$$

$$-\frac{1}{2} \varphi_{7A}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \varphi_{7A}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \quad (12)$$

$$= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F77A} G^{(2)} dS_F.$$

Полученные уравнения (11) и (12) являются интегральными уравнениями Фредгольма второго рода. Для численного решения смоченная и свободная поверхность разбивается на конечное число плоских панелей. Такой подход трансформирует исходное интегральное уравнение в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных потенциалов.

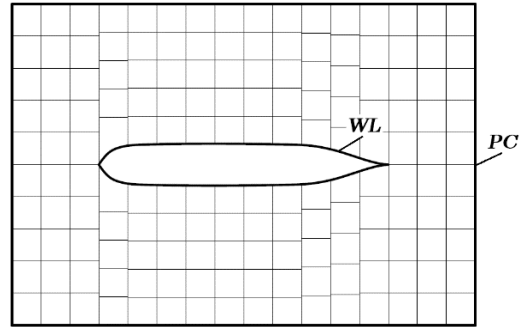


Рис. 1. Разбиение свободной поверхности на панели

Функция Грина $G^{(2)}$ может быть определена по одной из формул для бесконечно-глубокой жидкости:

$$\begin{aligned} G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \\ &+ 8\nu \int_0^{\infty} \frac{e^{k(z+\zeta)}}{k-4\nu} J_0(kR) dk + \\ &+ i8\pi\nu e^{4\nu(z+\zeta)} J_0(4\nu R). \end{aligned} \quad (13)$$

Для жидкости ограниченной глубины:

$$\begin{aligned} G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \\ &+ \int_0^{\infty} \frac{2(k+4\nu)e^{-kh} \cosh k(z+h)}{k \sinh kh - 4\nu \cosh kh} \cdot \\ &\cdot \cosh k(\zeta+h) J_0(kR) dk + \\ &+ i2\pi \frac{2((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2) \cosh 4\mu_0(z+h)}{((4\mu_0)^2 - (4\nu)^2)h + 4\nu} \cdot \\ &\cdot \cosh 4\mu_0(\zeta+h) J_0(\mu_0 R). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь

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

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

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

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

μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид: $\mu_0 \tanh(\mu_0 H) = v$;
 J_0 – функция Бесселя.

В выражениях (11) и (12) \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 $1/R$.

Аналогично задачам определения потенциалов, вызванных колебательным движением судна [2], [3] [4] в данном случае также возникает необходимость обходить вторые производные в граничных условиях (9) и (10).

Граничные условия на свободной поверхности, содержащие вторую производную, можно представить следующим образом:

$$\iint_{S_F} Q_{F77} G^{(2)} dS_F = \iint_{S_F} Q_{F77_1} G^{(2)} dS_F + \iint_{S_F} Q_{F77_2} G^{(2)} dS_F;$$

$$Q_{F77_1} = -\frac{i\omega}{g} \left[\left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{i\omega}{2g} \Phi_{77}^{(1)} \left(-\frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right);$$

$$Q_{F77_2} = \frac{i\omega}{2g} \Phi_{77}^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z^2};$$

Согласно [8], можно получить:

$$\iint_{S_F} \Phi_{77}^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F =$$

$$= - \iint_{WL+PC} \Phi_{77}^{(1)} (\nabla \Phi_{77}^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + \iint_{S_F} (\nabla \Phi_{77}^{(1)} \nabla \Phi_{77}^{(1)}) G^{(2)} dS_F + \iint_{S_F} \Phi_{77}^{(1)} (\nabla \Phi_{77}^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F.$$

Далее, подставляя (7) в выражения (15) и (16), можно выделить симметричную и асимметричную части граничного условия, аналогично (9), (10)

В выражении (13) \iint_{WL+PC} берется по контуру ватерлинии судна и по контуру, ограничивающему свободную поверхность жидкости на достаточно большом удалении от судна (рис. 1).

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

$$p_{77}^{(2)} = -\rho \frac{\partial \Phi_{77}^{(2)}}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right].$$

Нелинейные силы и моменты могут быть получены прямым интегрированием давления по смоченной поверхности и представлены как $F_{77}^{(2)} = F_{77I}^{(2)} + F_{77II}^{(2)}$, и $M_{77}^{(2)} = M_{77I}^{(2)} + M_{77II}^{(2)}$ где первые части зависят от потенциала второго порядка, а вторые части полностью определяется на основании решения задачи первого порядка.

Анализ результатов

На основании изложенного были разработаны две программы, реализующие определение нелинейных сил и моментов, обусловленных дифрагированным волнением с использованием функции Грина для бесконечно-глубокой жидкости (13) и функции Грина для жидкости ограниченной глубины (14) в случае когда $H \rightarrow \infty$.

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для четырех различных типов судов по каждой из двух программ для значение курсового угла $\beta = 90^\circ$. В таблице 1 приведены основные характеристики данных судов.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Лихтеровоз "Алексей Косыгин"	232	32	10.6	0.57	0.82
Танкер "Баскунчак"	74	12.0	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

На рисунках 2 – 4 представлены расчеты нелинейных сил при различном количестве панелей свободной поверхности слева и справа от судна в случае бесконечно-глубокой жидкости.

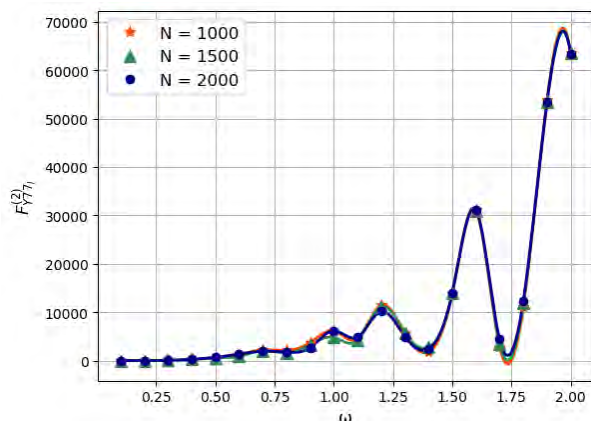


Рис. 2. $F_{X77}^{(2)}$ для лихтеровоза “Алексей Косыгин” при различном количестве панелей на свободной поверхности

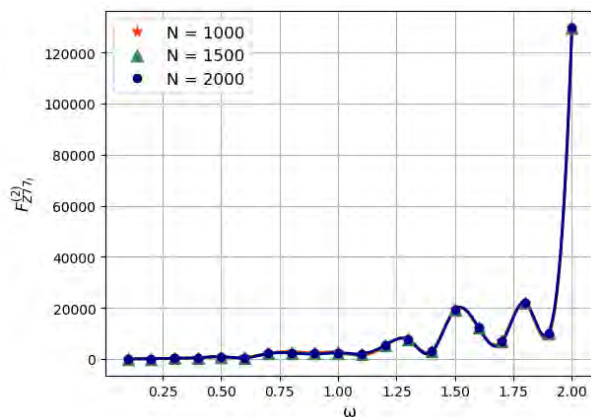


Рис. 3. $F_{Z77}^{(2)}$ для лихтеровоза “Алексей Косыгин” при различном количестве панелей на свободной поверхности

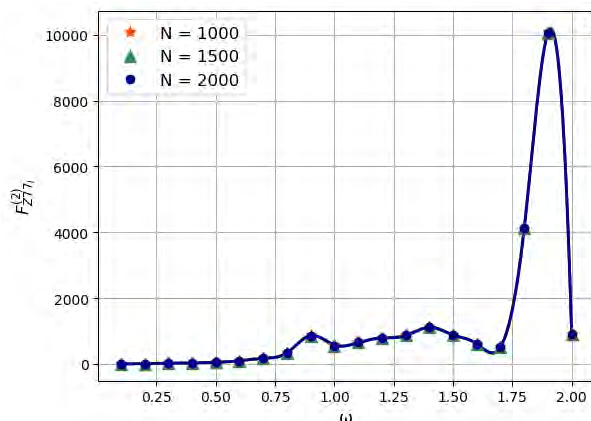


Рис. 4. $F_{Z77}^{(2)}$ для танкера “Баскунчак” при различном количестве панелей на свободной поверхности

Как видно из рисунков 2 – 4, сеточная сходимость по свободной поверхности достигнута.

Для валидации расчетного метода далее приводится сравнение нелинейных сил, полученных

по глубоководной трехмерной программе, с результатами, полученными при использовании двумерных методов [1], [5]. Принципиальное отличие использования двумерных методов при решении дифракционной задачи заключается в необходимости использования специальных методов расчета интегралов по свободной поверхности жидкости [1], [5]. При решении данной задачи трехмерным методом интегралы по свободной поверхности могут быть учтены прямым способом, благодаря затуханию подынтегральной функции.

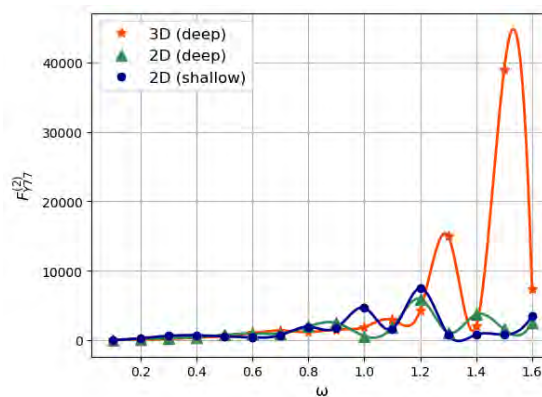


Рис. 5. Сравнение $F_{Y77}^{(2)}$ для лесовоза “Николай Новиков” по двумерной и трехмерной теории

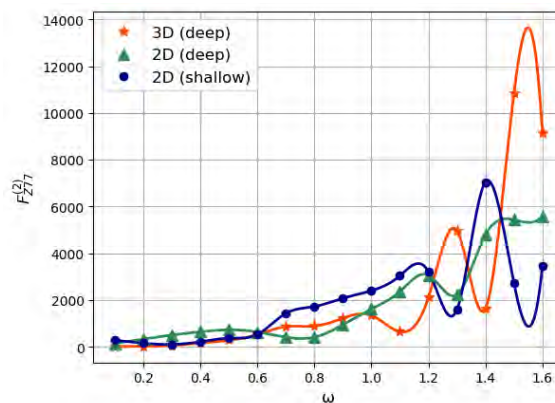


Рис. 6. Сравнение $F_{Z77}^{(2)}$ для лесовоза “Николай Новиков” по двумерной и трехмерной теории

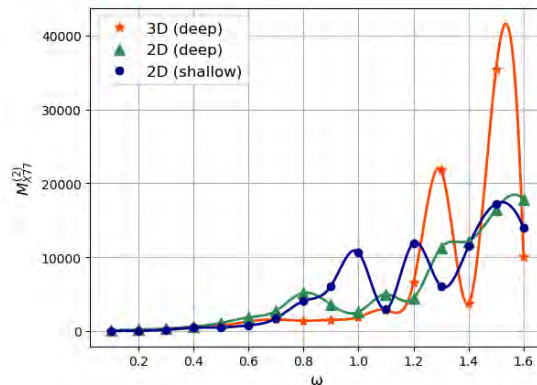


Рис. 7. Сравнение $M_{X77}^{(2)}$ для лесовоза “Николай Новиков” по двумерной и трехмерной теории

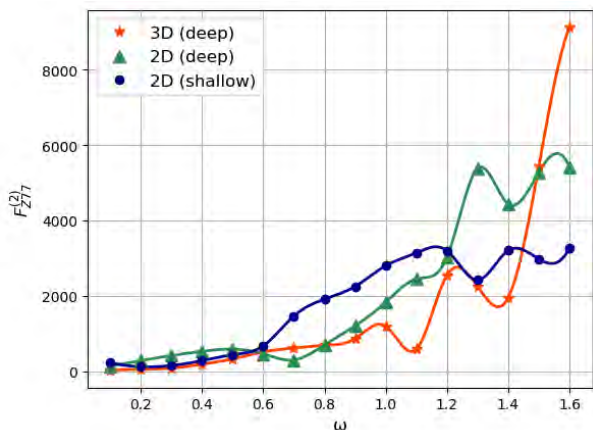


Рис. 8. Сравнение $F_{z77}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов" по двумерной и трехмерной теории

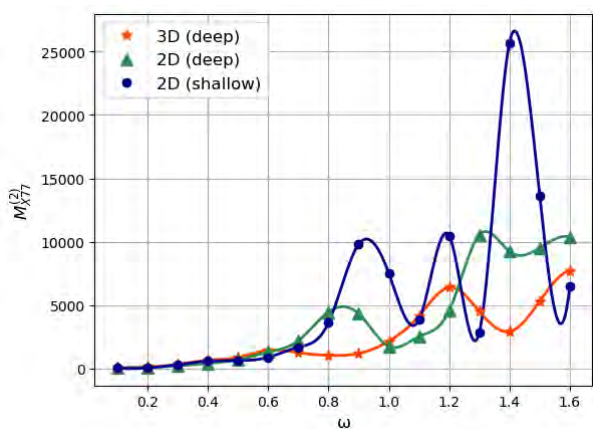


Рис. 9. Сравнение $M_{x77}^{(2)}$ для балкера "Капитан Панфилов" по двумерной и трехмерной теории

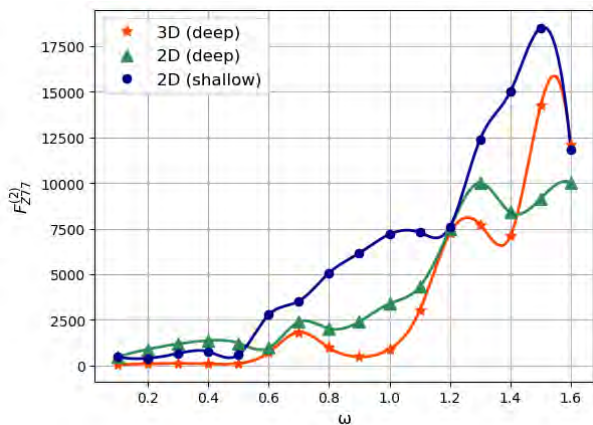


Рис. 10. Сравнение $F_{z77}^{(2)}$ лихтеровоза "Алексей Косыгин" по двумерной и трехмерной теории

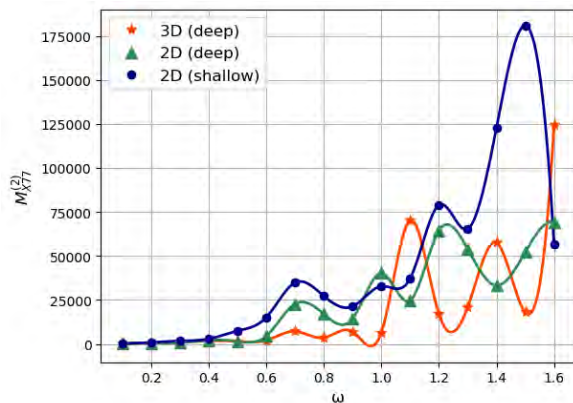


Рис. 11. Сравнение $M_{x77}^{(2)}$ лихтеровоза "Алексей Косыгин" по двумерной и трехмерной теории

Как видно из рисунков 5-11 дифракционные силы и моменты полученные по различным теориям сходятся достаточно хорошо. Особенно хорошее совпадение происходит в зоне частот от 0 до 0.8-1. Для расчетов по двумерной теории, как и для расчетов по трехмерной теории, также характерно наличие «пиков» в зоне высоких частот, что связано с влиянием нерегулярных частот, характерных при использовании метода интегральных уравнений.

Далее представлены сравнения нелинейных сил полученных с помощью различных функций Грина в трехмерной постановке. Функция Грина, характерная для мелководья (14) использовалась при $H/T=10$.

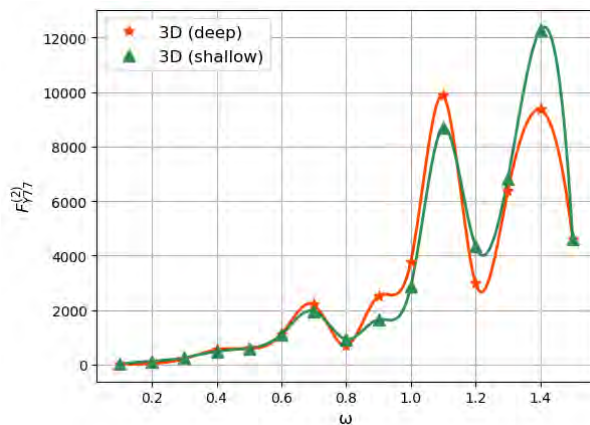


Рис. 12. $F_{y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин"

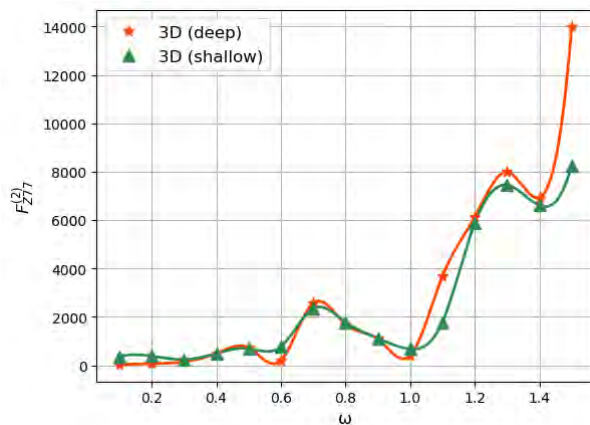


Рис. 13. $F_{z77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин"

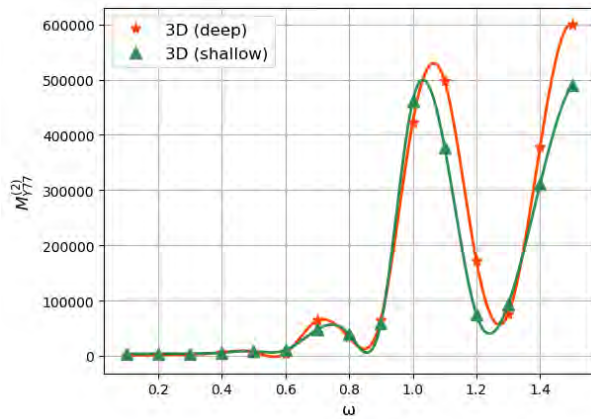


Рис. 14. $M_{\gamma_{77}}^{(2)}$ для пихтеровоза "Алексей Косыгин"

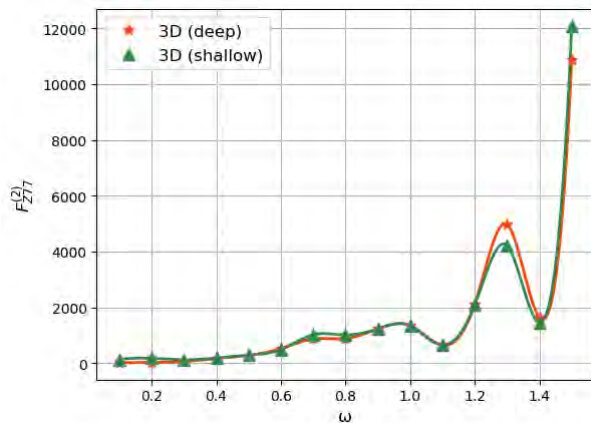


Рис. 15. $F_{Z_{77}}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"

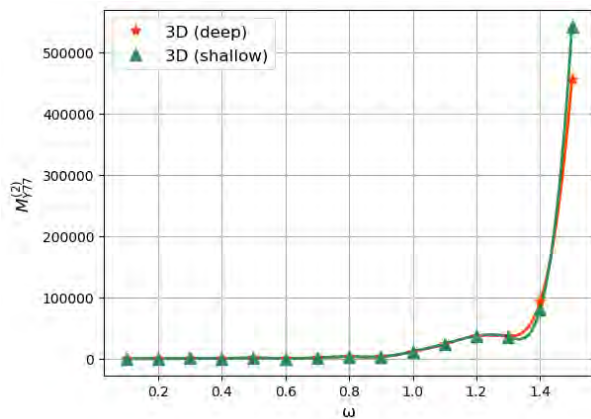


Рис. 16. $M_{\gamma_{77}}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков"

Из приведенных результатов видно, что нелинейные силы, полученные с использованием глубоководной и мелководной функции Грина (рис. 12-16), практически полностью совпадают.

Неоспоримым преимуществом трехмерных методов решения является возможность расчета дифракционных сил на произвольных курсовых углах напрямую без использования редуцированных коэффициентов. На рис.17- 20 приведены результаты расчетов составляющих дифракционных сил и моментов второго порядка для различных судов, выполненные для курсовых углов 90, 135 и 180.

Приведенные результаты показывают, что наибольшее влияние нелинейности, связанной с граничным условием на свободной поверхности жидкости имеет место при расположении судна лагом и на косых встречных курсовых углах.

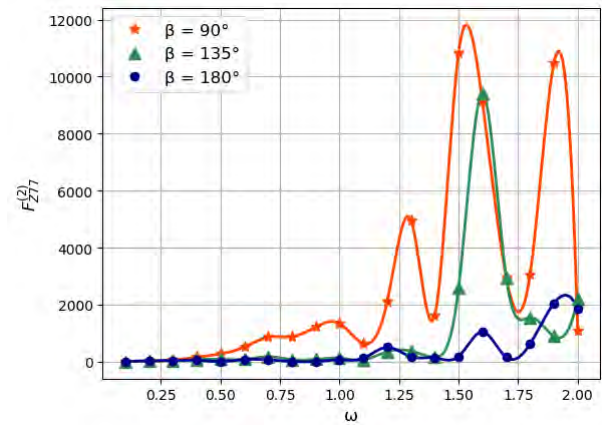


Рис. 17. $F_{Z_{77}}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков" при различных курсовых углах

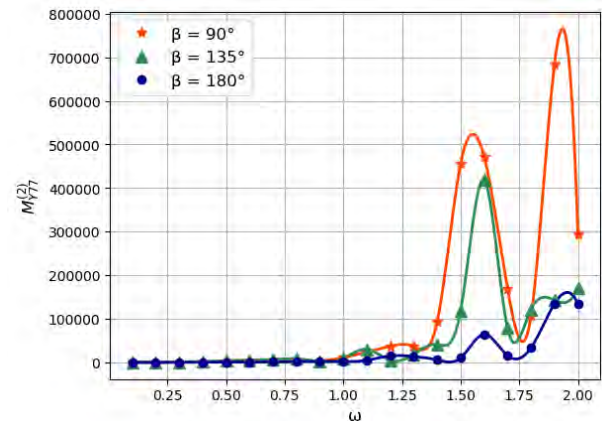


Рис. 18. $M_{\gamma_{77}}^{(2)}$ для лесовоза "Николай Новиков" при различных курсовых углах

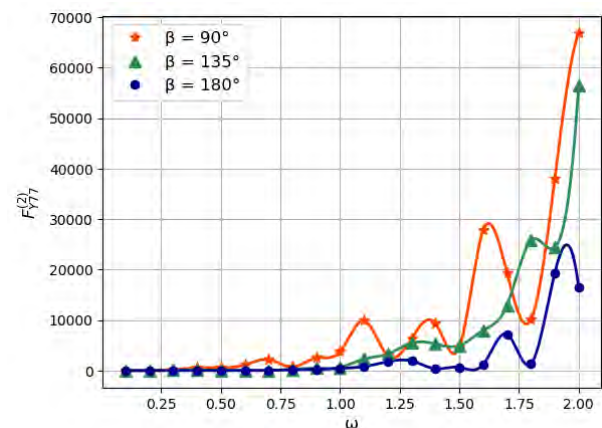


Рис. 19. $F_{\gamma_{77}}^{(2)}$ для пихтеровоза "Алексей Косыгин" при различных курсовых углах

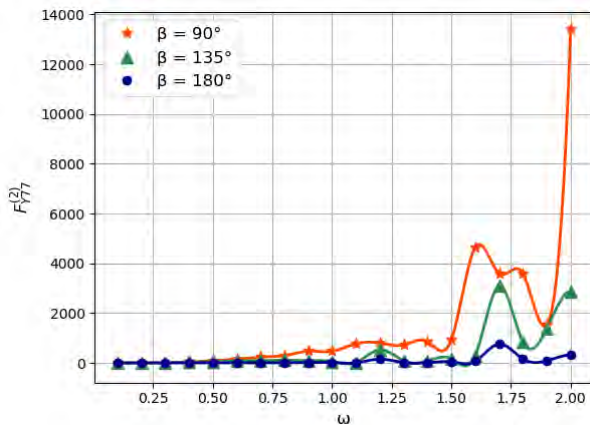


Рис. 20. $F_{y77}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" при различных курсовых углах

Заключение

Разработанные программы расчета позволяют рассчитывать все составляющие нелинейных сил и моментов, обусловленных дифрагированным волнением с учетом нелинейных граничных условий второго порядка на свободной поверхности жидкости. При этом разработанные алгоритмы и программы позволяют учесть напрямую интегралы по свободной поверхности, в отличие от двумерной теории.

Результаты, полученные при помощи различных функций Грина, имеют хорошее согласование друг с другом, а также в большинстве случаев двумерной теорией. Разработанные программы можно использовать при расчете нелинейных дифракционных сил на различных курсовых углах.

В дальнейшем, разработанные методики могут быть применены для расчета нелинейных сил второго порядка, обусловленных взаимодействием набегающего, дифрагированного волнения и волнения, вызванного различными видами качки.

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 (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при продольной качке судна Морские интеллектуальные технологии № 3 том 1, Стр.31-40
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. Kyozuka Y. (1980) Nonlinear hydrodynamic forces acting on two- dimensional bodies. (1 raport , diffraction problems) J. Soc. Naval Arch. of Japan, v.148, p.49-57.
7. 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
8. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
9. Papanikolaou A., Zarahonitis 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.

References

1. Semenova V. Ju. (2005) Razrabotka metoda rascheta nelinejnoj kachki sudov [Development of a method for calculating nonlinear 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, vznikayushchih pri vertikal'noj kachke sudna, na osnovanii trekhmernoj potencial'noj teorii. Morskije 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, vznikayushchih 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.Ju.,Al'baev D.A (2020) Opredelenie nelinejnyh sil vtorogo porjadka, vznikajushchih pri prodol'noj kachke sudna [Determination of nonlinear second-order forces arising from pitching of the ship] Morskije intellektual'nye tekhnologii № 3 том 1, 2020. Str.31-40.
5. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelinejnyh sil vtorogo poryadka, vznikayushchih 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 morskij tekhnicheskij universitet
6. Kyozuka Y. (1980) Nonlinear hydrodynamic forces acting on two- dimensional bodies. (1 raport, diffraction problems) J. Soc. Naval Arch. of Japan, v.148, p.49-57.
7. 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

8. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
9. 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

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. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

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

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

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 629.12.073.243.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.031>

Исследование нелинейных статических перемещений, возникающих при качке судна в различных стесненных фарватерах

В.Ю. Семенова¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, Н.А. Павлючук¹ e-mail: raf.castro@yandex.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье проводится исследование нелинейных статических перемещений, возникающих в случае качки судна на мелководье, качки судна параллельно вертикальной стенке и при совместной качке двух судов на мелководье. Определение статических перемещений осуществляется на основании определения соответствующих сил волнового дрейфа по методам, разработанным в предшествующих работах. Данные методы основаны на применении метода интегральных уравнений и зеркальных отображений для случая качки судна параллельно вертикальной стенке. Проведенное исследование в отечественной практике является новым. В статье приводятся результаты расчетов нелинейных статических перемещений, возникающих при вертикальной, бортовой и килевой качке различных типов судов. Проводится исследование влияния различных факторов на их величины, а именно: изменения относительной глубины фарватера, изменения расстояния между судном и вертикальной стенкой, изменения расстояния между судами, курсового угла. Показано увеличение значений нелинейных статических углов крена и дифферента, а также вертикальных перемещений при уменьшении относительной глубины, уменьшении расстояния между судами и расстояния между судном и стенкой. Приведено сравнение значений статических перемещений, возникающих в различных стесненных фарватерах при прочих равных условиях.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, силы волнового дрейфа, нелинейные статические перемещения, мелководье, совместная качка, трехмерная потенциальная задача, гидродинамическое взаимодействие

Investigation of nonlinear static displacements during the ship's motions in various confined waterways

Viktoriya Yu. Semenova¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, Nikita A. Pavlyuchuk¹ e-mail: raf.castro@yandex.ru¹St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article investigates nonlinear static displacements arising in the case of a ship's motions in shallow water, motions of a ship parallel to a vertical wall and during coupled motions of two ships in shallow water. The determination of static displacements is carried out on the basis of determining the corresponding forces of wave drift according to the methods developed in previous works. These methods are based on the application of the method of integral equations and mirror images for the case of the ship's motions parallel to the vertical wall. The research carried out in domestic practice is new. The article presents the results of calculations of nonlinear static displacements occurring during heaving, rolling and pitching of various types of ships. A study of the influence of various factors on their values is being carried out, namely: changes in the relative depth of the waterway, changes in the distance between the ship and the vertical wall, changes in the distance between ships, heading angle. An increase in the values of nonlinear static angles of roll and trim, as well as vertical displacements with a decrease in the relative depth, a decrease in the distance between ships and the distance between the ship and the wall, is shown. A comparison of the values of static displacements arising in various confined waterways, all other things being equal, is given.

Keywords: method of the integral equations, wave drift forces, nonlinear static displacements, shallow water, the coupled motions of ship, three dimensional potential problem, hydrodynamic interaction.

Введение

Огромное значение в расчетах мореходности имеет определение сил волнового дрейфа в различных стесненных фарватерах, а именно: на мелководье, параллельно вертикальной стенке, параллельно второму качающемуся судну. Определение данных сил тесно связано с проблемой безопасности мореплавания. Силы волнового дрейфа должны учитываться при анализе движения судов в штормовых условиях, поскольку они оказывают непосредственное влияние на характеристики качки и управляемости.

В работах Щегорев С.В. [3], [4],[5], Со Мое Аунг [2], Аунг Мью Тхант [1] были разработаны численные методы и апробированы программы расчета сил волнового дрейфа, возникающих на мелководье, при качке параллельно вертикальной стенке и при совместной качке двух судов на мелководье. В работах проведено исследование влияния изменения относительной глубины [3],[4],[5]

, расстояния между судном и вертикальной стенкой [2] и расстоянием между судами [1] на значения данных сил. В работах [1], [2] показано значительное совместное влияние изменения относительной глубины и расстояния между судном и вертикальной стенкой, а также расстояния между судами на значения сил волнового дрейфа. В работах Lim [6], Kumar [7], была произведена оценка сил волнового дрейфа, действующих на качающиеся параллельно вертикальной стенке танкер и понтон.

Основной интерес представляют продольная и поперечная силы волнового дрейфа и разворачивающий момент. Данные реакции влияют на системы позиционирования, якорные системы, но не вызывают появления статических перемещений. Вертикальная сила волнового дрейфа, а также кренящий и дифференцирующий моменты вызывают появление нелинейных статических перемещений, а именно: вертикальное перемещение центра тяжести, статический угол крена и статический угол дифферента. Все эти статические перемещения

имеют второй порядок малости, однако, могут негативно влиять на характеристики качки в целом.

В настоящей работе проводится исследование поведения статических перемещений второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье, при качке судна параллельно вертикальной стенке и при совместной качке двух судов на мелководье с целью оценки влияния на них изменения относительной глубины, расстояния между судном и стенкой и расстояния между двумя судами.

Описание метода

Общие формулы, согласно которым производится определение сил волнового дрейфа независимо от вида фарватера, имеют вид [5]:

$$F_C^{(2)}(x, y, z) = \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left\{ \left[(\xi_g + (\psi z - \chi y)) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + \left[\eta_g - (\theta z - \chi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + \left[\zeta_g + (\theta y - \psi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \right\} \bar{n} d\Omega_0 + \rho \frac{1}{4} \iint_{\Omega_0} \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \bar{n} d\Omega_0 + \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left(g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right) (\bar{\alpha} \times \bar{n}) d\Omega_0 - \frac{1}{4} \rho g \int_{WL} z_w \bar{z}_w \bar{n} dS.$$

$$M_C^{(2)}(x, y, z) = \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left\{ \left[(\xi_g + (\psi z - \chi y)) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + \right.$$

$$\left. + \left[\eta_g - (\theta z - \chi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + \left[\zeta_g + (\theta y - \psi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \right\} (\bar{r} \times \bar{n}) d\Omega_0 + \rho \frac{1}{4} \iint_{\Omega_0} \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) (\bar{r} \times \bar{n}) d\Omega_0 + \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left(g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right) (\bar{\alpha} \times (\bar{r} \times \bar{n})) d\Omega_0 - \frac{1}{4} \rho g \int_{WL} z_w \bar{z}_w dS,$$

где

$$z_w = - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \Big|_{\zeta=0} - \zeta_g + x_w \psi - y_w \theta$$

Определение входящих в выражения для сил волнового дрейфа потенциалов, производилось авторами при качке на мелководье согласно программе расчета, разработанной в [5], при качке параллельно вертикальной стенке согласно [2] и при совместной качке двух судов на мелководье согласно программе из работы [1]. Апробация расчетов сил волнового дрейфа также проведена в перечисленных работах.

Зная значения сил волнового дрейфа, можно определить статические перемещения второго порядка, возникающие при бортовой, килевой и вертикальной качки. Данные нелинейные статические перемещения определяются согласно следующим выражениям:

$$\theta^{(2)} = \frac{M_{Dn_0}^{(2)}}{Dn_0};$$

$$\psi^{(2)} = \frac{M_{Dn_0}^{(2)}}{Dn_0};$$

$$\zeta^{(2)} = \frac{F_{\zeta}^{(2)}}{\rho g S}$$

Анализ результатов

На основании изложенного проведены расчеты нелинейных статических перемещений в различных стесненных фарватерах для курсовых углов 90, 135 и 180. Все значения статических перемещений приводятся отнесенными к квадрату ординаты волнового профиля. В таблице 1 приведены основные характеристики судов, для которых проводились расчеты.

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Лихтеровоз "Алексей Косыгин"	232	32	10.6	0.57	0.82
Ледокол «Севморпуть»	228,8	31,6	11,8	0,656	0,820
Ледокол «Витус Беринг»	142	22,4	8,5	0,642	0,821
Лесовоз "Николай Новиков"	140	21	8.68	0.74	0.83

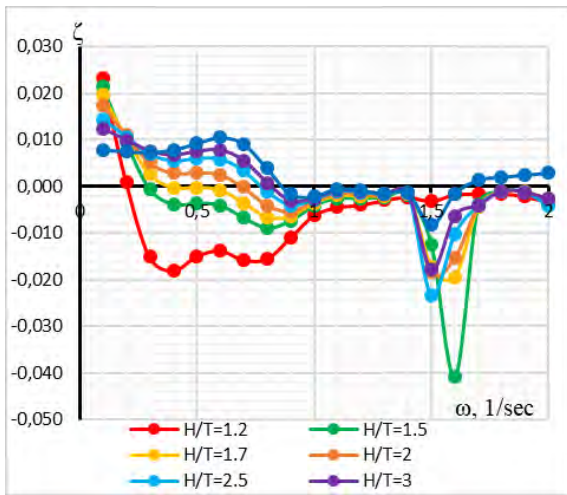


Рис. 1. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой ролкера «Стахановец Котов» при различной H/T и постоянного КУВ=180

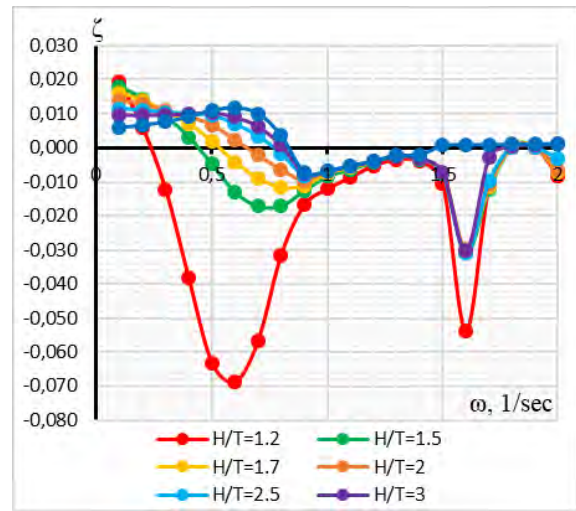


Рис. 4. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой лесовоза «Николай Новиков» при различной H/T и постоянного КУВ=135

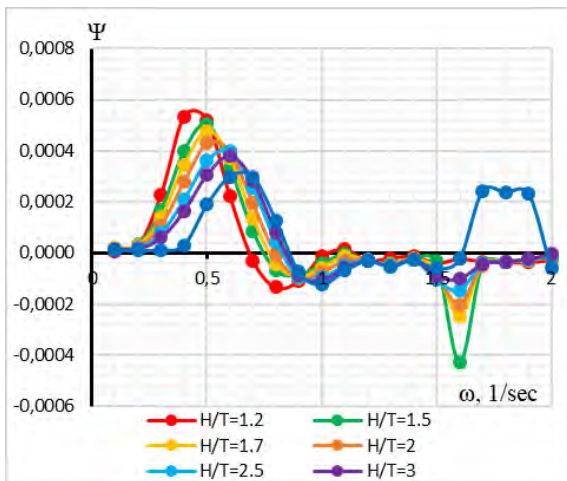


Рис. 2. Статические перемещения, вызываемые килевой качкой ролкера «Стахановец Котов» при различной H/T и постоянного КУВ=180

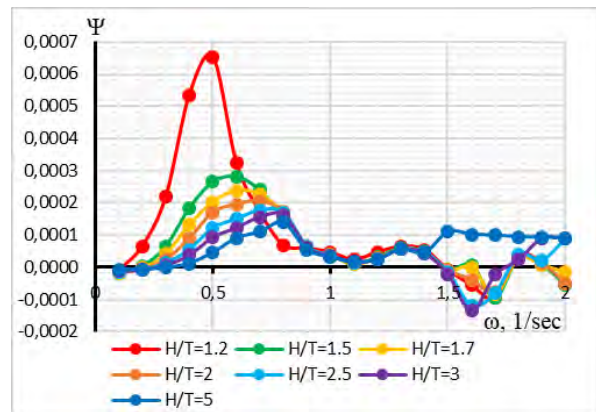


Рис. 5. Статические перемещения, вызываемые килевой качкой лесовоза «Николай Новиков» при различной H/T и постоянного КУВ=135

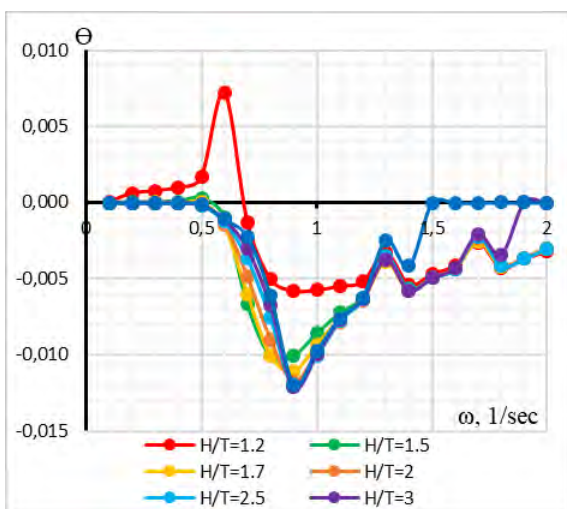


Рис. 3. Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой лесовоза «Николай Новиков» при различной H/T и постоянного КУВ=90

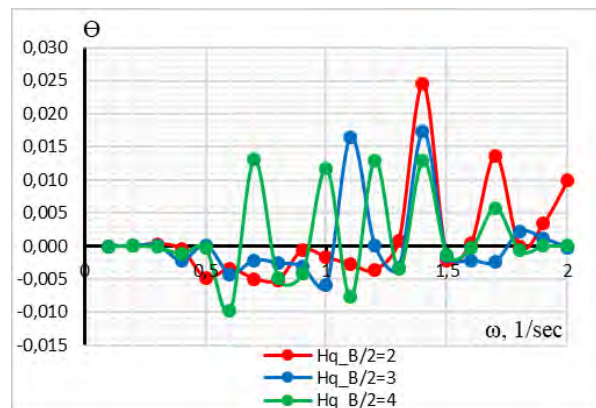


Рис. 6 Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой при различных расстояниях от вертикальной стенки судна «Севморпуть» Hq_B/2 при постоянных характеристиках H/T=1,2; КУВ=90

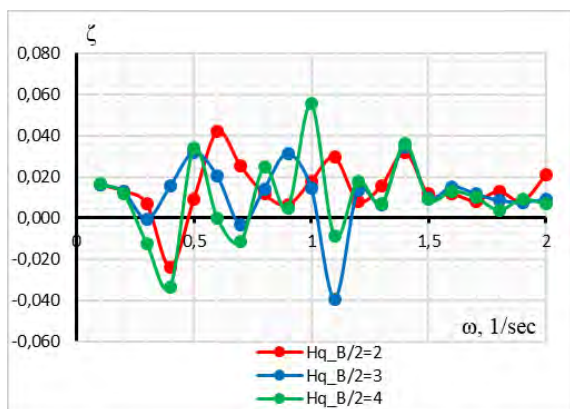


Рис. 7 Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ судна «Севморпуть» и постоянных характеристиках $H/T=1,2; KUB=90$

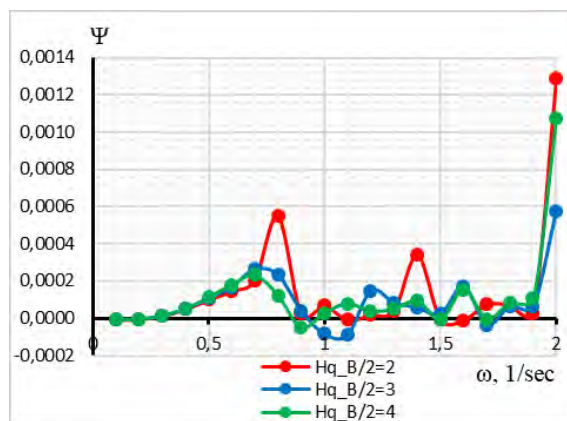


Рис. 10. Статические перемещения, вызываемые килевой качкой лесовоза «Николай Новиков» при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ и постоянных характеристиках $H/T=2,5; KUB=135$.

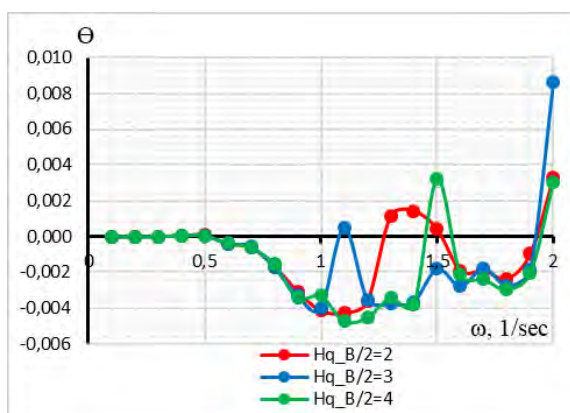


Рис. 8. Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой лесовоза «Николай Новиков» при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ и постоянных характеристиках $H/T=2,5; KUB=135$.

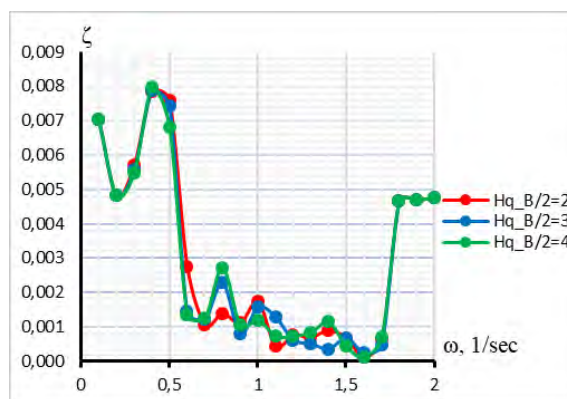


Рис. 11. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой судна «Севморпуть» при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ и постоянных характеристиках $H/T=2,5; KUB=180$.

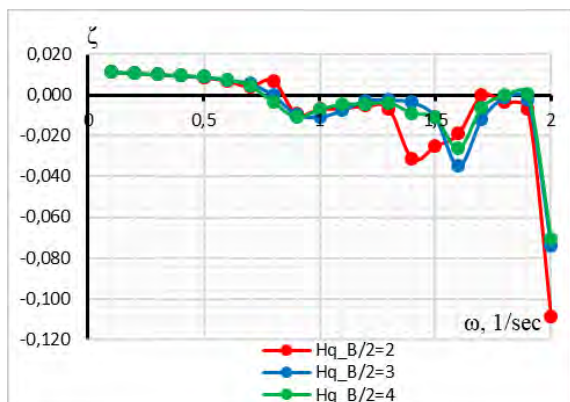


Рис. 9. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой лесовоза «Николай Новиков» при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ и постоянных характеристиках $H/T=2,5; KUB=135$.

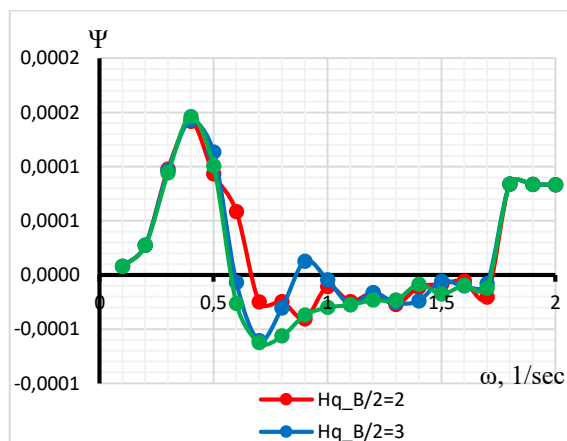


Рис. 12. Статические перемещения, вызываемые килевой качкой судна «Севморпуть» при различных расстояниях от вертикальной стенки $Hq_B/2$ и постоянных характеристиках $H/T=2,5; KUB=180$.

На рис.1-5 приведены статические перемещения, возникающие при вертикальной, бортовой и килевой качке различных судов при изменении относительной глубины Н/Т. Из всех приведенных графиков видно, что независимо от курсового угла, все статические перемещения имеют максимальные по абсолютной величине значения при минимальном отношении Н/Т. Так, значения вертикальных перемещений при Н/Т=1.2 и $\omega=0.6$ практически в семь раз больше соответствующих значений при Н/Т=5 (рис.4). Тоже можно сказать и про статический дифферент второго порядка (рис.5). Для нелинейных статических перемещений при увеличении относительной глубины характерно изменение знака. Вертикальные статические перемещения меняют знак с отрицательного на положительный, статический угол крена, наоборот, может менять знак с положительного на отрицательный.

На рис.6-12 представлены результаты расчетов статических перемещений при качке судна на мелководье параллельно вертикальной стенке. Проведено исследование влияния изменения расстояния до вертикальной стенки на статические перемещения при различных курсовых углах. Анализ полученных результатов показал, что наибольшее влияние стенки на поведение статических перемещений наблюдается при расположении судна лагом (рис.6,7). Для графиков зависимостей статических перемещений характерно наличие нескольких «пиков». Имеет место сдвиг максимальных значений «пиков» при уменьшении относительной глубины в область высоких частот. Наличие «пиков» обусловлено соответствующим поведением дрейфовых сил и моментов, отмеченному в работе [2]. С увеличением расстояния до стенки количество пиков возрастает (рис.6,7). Из-за наличия пиков при расположении судна лагом происходит постоянная смена знака статических перемещений бортовой и вертикальной качки. Так, при качке ледокола «Севморпуть» на относительном расстоянии до стенки $H_q B/2=2$ на частоте $\omega=0.6$ статический угол крена равен -0.01, на частоте $\omega=0.7-0.014$ и на частоте $\omega=0.7$ снова -0.005.

При курсовом угле $\beta=135$ влияние изменения расстояния до стенки проявляется в зоне частот $\omega > 1$ (рис.8-10). Здесь в большинстве случаев при уменьшении данного расстояния статические перемещения имеют большие значения (рис.9,10). В зоне частот $\omega < 1$ статические перемещения имеют одинаковые значения, независимо от расстояния до стенки.

При курсовом угле $\beta=180$ влияние изменения расстояния до стенки проявляется еще меньше (рис.11,12).

На рис. 13-20 приведены результаты расчетов статических перемещений, возникающих при совместной качке двух одинаковых судов на мелководье при различных относительных расстояниях между судами. При совместной качке двух судов для графиков зависимостей статических перемещений от частоты также характерно наличие «пиков». Значения всех перемещений при этом увеличиваются при уменьшении расстояния между судами.

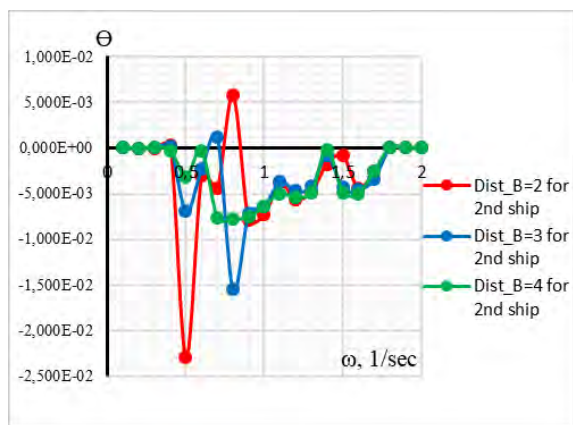


Рис. 13. Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой двух судов «Севморпуть» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках Н/Т=2,5; КУВ=90.

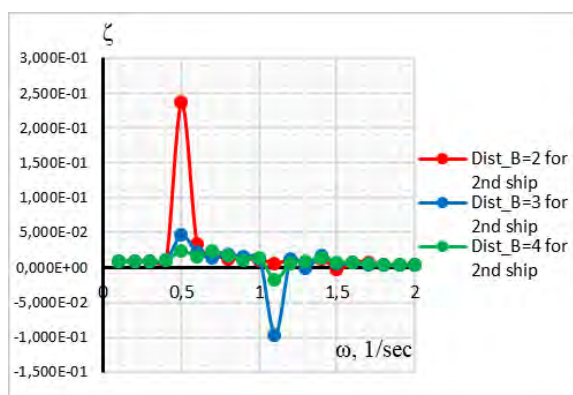


Рис. 14. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой двух судов «Севморпуть» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках Н/Т=2,5; КУВ=90

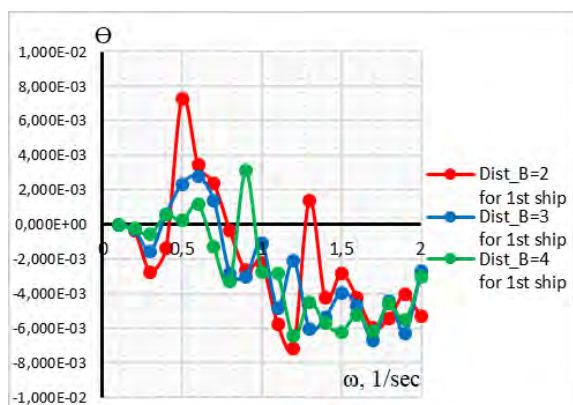


Рис. 15 Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой двух судов «Стахановец Котов» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках Н/Т=1,2; КУВ=135.

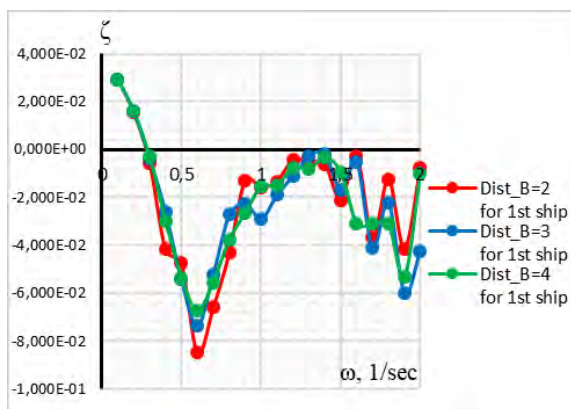


Рис. 16. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой двух судов «Стахановец Котов» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках $H/T=1,2$; $KUB=135$.

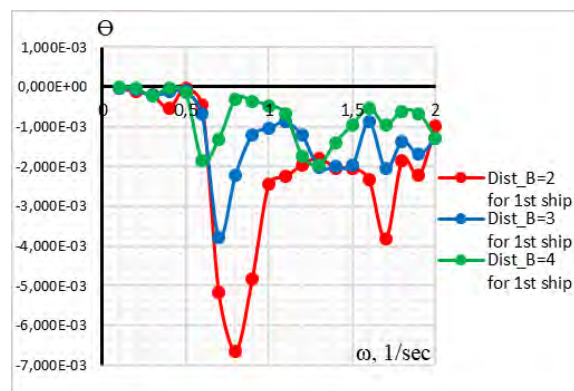


Рис. 19 Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой двух ледоколов «Витус Беринг» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках $H/T=1,2$; $KUB=180$.

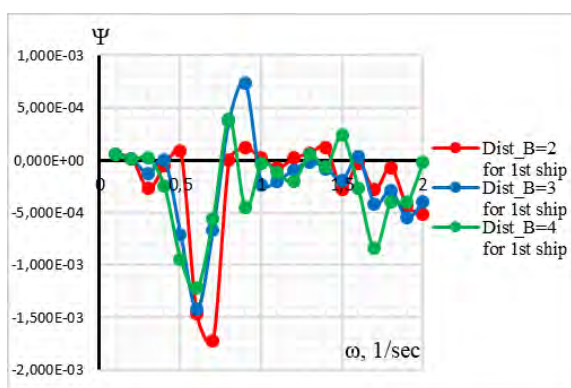


Рис. 17. Статические перемещения, вызываемые килевой качкой двух судов «Стахановец Котов» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках $H/T=1,2$; $KUB=135$.

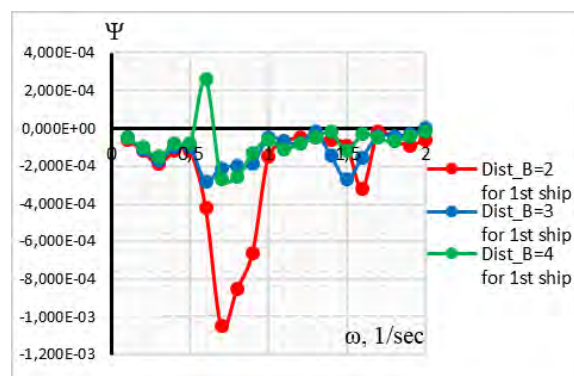


Рис. 20 Статические перемещения, вызываемые килевой качкой двух ледоколов «Витус Беринг» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках $H/T=1,2$; $KUB=180$.

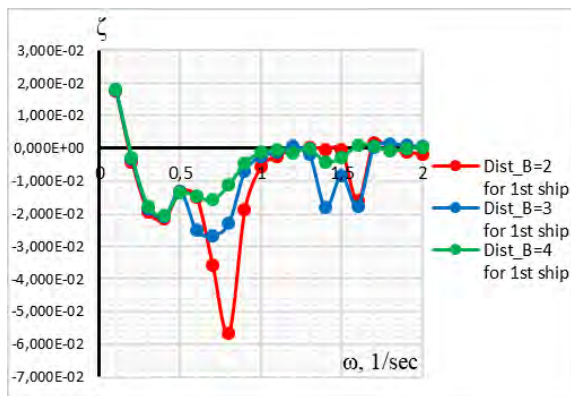


Рис. 18 Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой двух ледоколов «Витус Беринг» при различной дистанции между судами и постоянных характеристиках $H/T=1,2$; $KUB=180$.

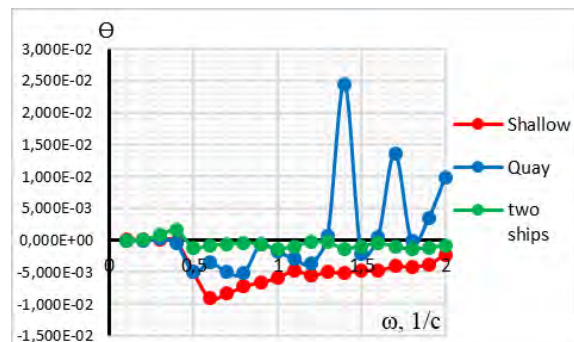


Рис. 21. Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой судна «Севморпуть» в разных фарватерах, при $\beta=90$; $H/T=1,2$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

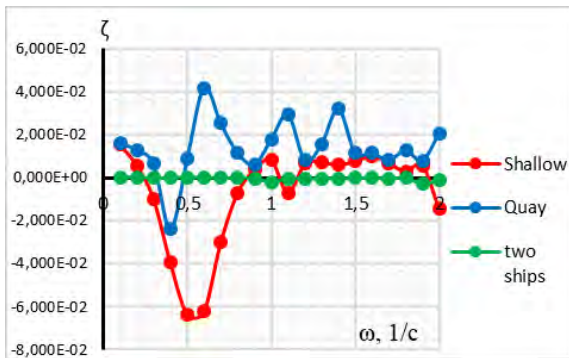


Рис. 22. Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой судна «Севморпуть» в разных фарватерах, при $\beta=90$; $H/T=1,2$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$ различных стесненных фарватерах

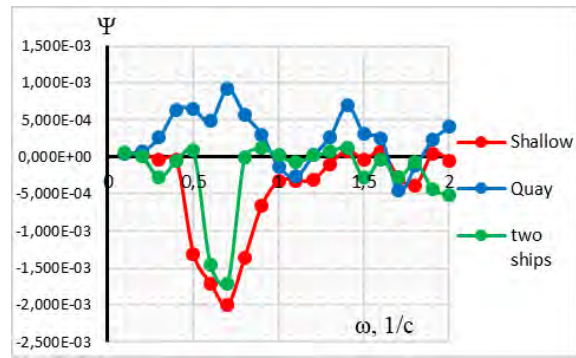


Рис. 25 Статические перемещения, вызываемые килевой качкой судна «Стахановец Котов» в разных фарватерах, при $\beta=135$; $H/T=1,2$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

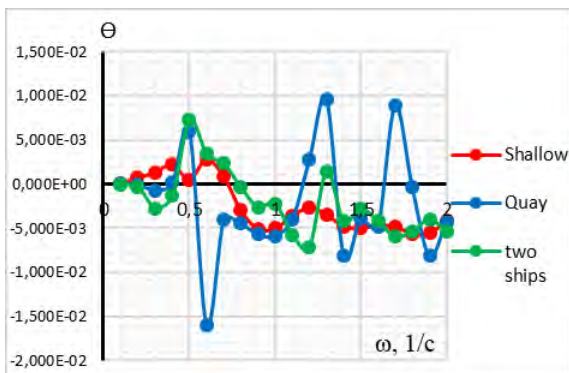


Рис. 23. Статические перемещения, вызываемые бортовой качкой судна «Стахановец Котов» в разных фарватерах, при $\beta=135$; $H/T=1,2$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

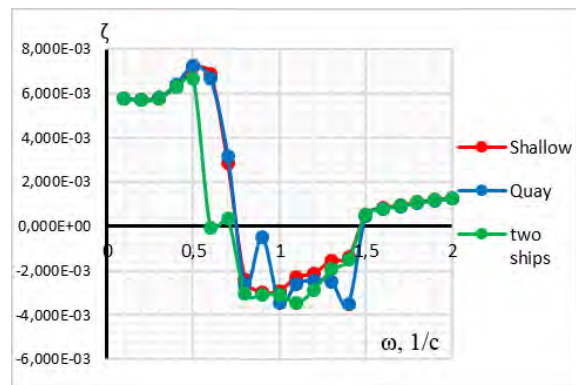


Рис. 26 Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой судна «Николай Новиков» в разных фарватерах, при $\beta=180$; $H/T=5$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

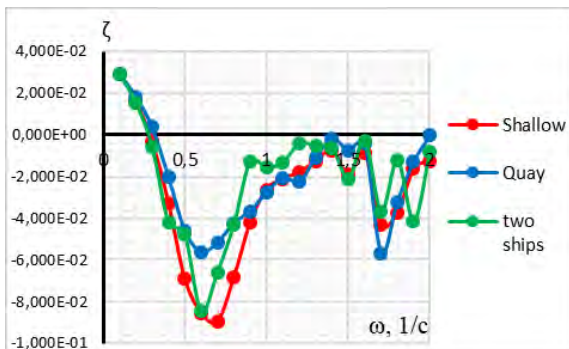


Рис. 24 Статические перемещения, вызываемые вертикальной качкой судна «Стахановец Котов» в разных фарватерах, при $\beta=135$; $H/T=1,2$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

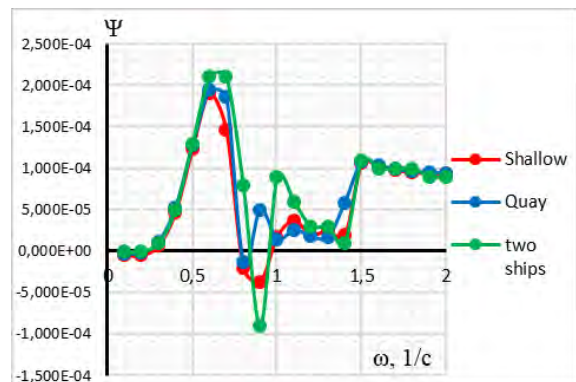


Рис. 27 Статические перемещения, вызываемые килевой качкой судна «Николай Новиков» в разных фарватерах, при $\beta=180$; $H/T=5$; $Hq_B/2=2$; $Dist_B=2$

Так, значение вертикального статического перемещения при бортовой качке судна «Стахановец Котов» на частоте $\omega=0.5$ и относительном расстоянии между судами, равном $2B/2$ больше в 3,5 раза соответствующего перемещения при расстоянии, равном $3B/2$ (рис.15). Из-за взаимодействия бортовой, килевой и вертикальной качки между собой на встречных курсовых углах появляются статические углы крена (рис.19), которые увеличиваются по абсолютному значению при уменьшении расстояния между судами и могут быть в несколько раз больше статических дифферентов (рис.19,20) или соизмеримы с ними.

На рис.21-27 приведены сравнения статических перемещений, возникающих в различных условиях плавания. При этом расстояния между судном и стенкой и судном и вторым судном задаются одинаковыми. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что в большинстве случаев наибольшие статические перемещения имеют место при качке судна параллельно вертикальной стенке (рис.21,23). Статические

перемещения, возникающие на мелководье и при совместной качке, могут иметь одинаковый знак (рис.23,25). При увеличении расстояния между судном и стенкой и между двумя судами, статические перемещения, определенные для различных фарватеров, практически совпадают между собой. Вид фарватера в меньшей степени проявляется при качке на встречных курсовых углах (рис.26,27) и в большей степени при расположении судна лагом (рис. 22)

Заключение

Проведенные расчеты нелинейных статических перемещений возникающих в различных стесненных фарватерах показали значительное влияние на их величины уменьшения относительной глубины, расстояния между судном и вертикальной стенкой и расстояния между двумя судами. Увеличение статических перемещений будет способствовать увеличению углов крена и дифферента при качке и должно быть учтено при оценке мореходности судна.

Литература

1. Семенова В.Ю. Аунг Мью Тхант (2017) Определение сил волнового дрейфа, возникающих при совместной качке двух на регулярном волнении в условиях мелководья Морские интеллектуальные технологии, № 4(38) Т.1 , стр.16-31
2. Со Мое Аунг(2012), Определение сил волнового дрейфа при качке судна параллельно вертикальной преграде на мелководье Морской Вестник, Специальный выпуск N1 (124), с.25-28
3. Семенова В.Ю., Борисов Р.В., Щегорец С.В.(2013) Исследование влияния относительной глубины фарватера и курсового угла на силы волнового дрейфа при качке судна на мелководье. Морской Вестник, Специальный выпуск N2 (125), с.76-81
4. Семенова В.Ю., Щегорец С.В. (2014) О влиянии качки судна на составляющие силы и моменты волнового дрейфа. Морские интеллектуальные технологии N 2(24) Т.2, стр.16-22
5. Щегорец С.В.(2014) Исследование и разработка численного метода определения сил волнового дрейфа при качке объекта в условиях мелководья.: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук:05.08.01 / ФГУП КГНЦ.
6. Lim S.H. (2007) Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations . Thesis, Texas University.
7. Kumar B.(2005) Dynamic analysis of floating quay and container ship for container loading and offloading operation. Thesis. Texas University.

References

1. Semenova V.Yu. Aung M'o Tkhant (2017) Opredelenie sil volnovogo dreyfa, vznikayushchikh pri sovmestnoy kachke dvukh na regul'yarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya [The determination of the wave drift forces acting on two ships during their coupled motions on the regular waves in the shallow water]Morskie in-tellektual'nye tekhnologii, № 4(38) Т.1 , str.16-31
2. So Moe Aung (2012), Opredelenie sil volnovogo dreyfa pri kachke sudna parallel'no vertikal'noy pregrade na melkovod'e[Determination of wave drift forces during the ship's motions parallel to a vertical obstacle in shallow water] Morskoy Vestnik, Spetsial'nyy vypusk N1 (124), с.25-28
3. . Semenova V.Yu., Borisov R.V., Shchegorets S.V. (2013) Issledovanie vliyaniya odnositel'noy glubiny farvaterya i kursovogo ugla na sily volnovogo dreyfa pri kachke sudna na melkovod'e.[Investigation of the influence of the relative depth of the fairway and the heading angle on the forces of wave drift during the ship's motions in shallow water] Morskoy Vestnik, Spetsial'nyy vypusk N2 (125), с.76-81
4. Semenova V.Yu., Shchegorets S.V. (2014) O vliyanii kachki sudna na sostavlyayushchie sily i momenty volnovogo dreyfa [On the influence of the ship's motions on the force components and moments of wave drift]. Morskie intellektual'nye tekhnologii N 2(24) Т.2, str.16-22
5. Shchegorets S.V. (2014)Issledovanie i razrabotka chislennogo metoda opredeleniya sil volnovogo dreyfa pri kachke ob"ekta v usloviyakh melkovod'ya [Research and development of a numerical method for determining the forces of wave drift during the object's motions in shallow water conditions] Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk:05.08.01 / FGUP KGNTs.
6. Lim S.H.(2007) Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations . Thesis, Texas University.
7. Kumar B.(2005) Dynamic analysis of floating quay and container ship for container loading and offloading operation. Thesis. Texas University.

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. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

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

Никита Андреевич Павлючук, Студент (Магистр), Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: raf.castro@yandex.ru

Nikita A. Pavlyuchuk, Student (Master), State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: raf.castro@yandex.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 629.12.073.243.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.032>

Определение возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик при совместной качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке

В.Ю. Семенова¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, К.И. Баканов¹ e-mail: kirill.bakanov@mail.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается определение возмущающих сил и моментов и амплитудно-частотных характеристик возникающих при совместной качке двух судов в условиях мелководья параллельно вертикальной стенке на основании решения трехмерной потенциальной задачи. Определение потенциалов дифрагированного волнения, необходимых для расчетов возмущающих сил, осуществляется на основании методов интегральных уравнений и зеркальных отображений. Представленное решение в отечественной практике является новым. В статье приводятся результаты расчетов возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаний, возникающих при качке двух одинаковых судов, расположенных лагом к волнению и параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний как между судами, так и между судами и вертикальной стенкой. Проводится исследование влияния различных фарватеров на величины возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик, а именно: мелководного фарватера, мелководного фарватера с вертикальной стенкой, мелководного фарватера со вторым параллельно качающимся судном и мелководного фарватера с вертикальной стенкой и вторым судном. Таким образом, в работе учитывается одновременное влияние мелководья, вертикальной стенки и второго судна. Показано увеличение значений возмущающих сил при уменьшении расстояний между судами и между судами и вертикальной стенкой. Также показано значительное совместное влияние вертикальной стенки и второго судна на амплитудно-частотные характеристики по сравнению со случаем качки судна на мелководье.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, функция Грина, возмущающие силы, амплитудно-частотные характеристики и демпфирования, мелководье, совместная качка, трехмерная потенциальная задача, гидродинамическое взаимодействие

Determination of exciting forces and amplitude-frequency characteristics during coupled motions of two ships in shallow water parallel to the vertical wall

Viktoriya Yu. Semenova¹ e-mail: sem_viktoria@mail.ru, Kirill I. Bakanov¹ e-mail: kirill.bakanov@mail.ru¹St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the determination of the exciting forces and moments and amplitude-frequency characteristics arising from the coupled motions of two ships in shallow water conditions parallel to the vertical wall based on the solution of a three-dimensional potential problem. The determination of the potentials of diffracted waves, necessary for calculating the exciting forces, is carried out on the basis of the methods of integral equations and mirror images. The presented solution is new in domestic practice. The article presents the results of calculations of exciting forces and amplitude-frequency characteristics of swaying, heaving and rolling arising from the motions of two identical ships located in the beam waves and parallel to the vertical wall, depending on the change in the distances both between ships and between ships and vertical wall. A study of the influence of various waterways on the magnitude of exciting forces and amplitude-frequency characteristics is being carried out, namely: a shallow waterway, a shallow waterway with a vertical wall, a shallow waterway with a second parallel oscillating ship and a shallow waterway with a vertical wall and a second ship. Thus, the work takes into account the simultaneous influence of shallow water, vertical wall and the second ship. An increase in the values of the exciting forces is shown with a decrease in the distances between ships and between ships and the vertical wall. A significant joint effect of the vertical wall and the second ship on the amplitude-frequency characteristics is also shown in comparison with the case of the ship oscillating in shallow water.

Keywords: method of the integral equations, Green function, exciting forces, amplitude-frequency characteristics, shallow water, the coupled motions of ship, three dimensional potential problem, hydrodynamic interaction.

Введение

Определение возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик в различных фарватерах проводилось в работах Тан Хтун Аунг, Со Мое Аунг, Аунг Мьо Тхант и Семеновой В.Ю. [1],[2],[3], [4]. В этих работах были разработаны численные методы и апробированы программы расчета возмущающих сил и амплитуд качки судна на мелководье, параллельно вертикальной стенке и совместной качки двух судов на мелководье. В работах проведено исследование влияния изменения относительной глубины [1], расстояния между судном и вертикальной стенкой [4] и расстоянием

между судами [2], [3] на амплитудные значения возмущающих сил и амплитудно-частотные характеристики различных видов качки. Показано значительное совместное влияние изменения относительной глубины и расстояния между судном и вертикальной стенкой, а также расстояния между судами на перечисленные характеристики. В данных работах было порознь исследовано влияние вертикальной стенки и наличия второго судна на гидродинамические коэффициенты. В работе Lim [7] исследована совместная качка танкера и плавучего понтона параллельно вертикальной стенке и приведены результаты расчетов возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик для

фиксированных расстояний между объектами. Исследования влияния изменения расстояний на величины данных характеристик не проводилось.

Настоящая работа является продолжением работы авторов [5] и в ней решается задача определения возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик при учете совместного влияния на судно вертикальной стенки и параллельно качающегося второго судна в условиях мелководья, производится оценка данного совместного влияния на величины амплитудных характеристик возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик и исследование изменения расстояний между судами и между судами и стенкой на их значения.

Описание метода

В соответствии с линейной теорией качки судна, потенциалы скорости движения жидкости судна А и судна В. В при качке параллельно вертикальной стенке Φ_A и Φ_B можно представить в виде следующей суперпозиции [3]:

$$\Phi_A = \varphi_{0A}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7AA}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7BA}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_{jA} \varphi_{jAA} + \sum_{j=1}^6 U_{jB} \varphi_{jBA}, \quad (1)$$

$$\Phi_B = \varphi_{0B}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7BB}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_{7AB}(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_{jB} \varphi_{jBB} + \sum_{j=1}^6 U_{jA} \varphi_{jAB},$$

где U_{jA}, U_{jB} - скорости отдельных видов качки судна А и судна В, $\varphi_{0A}, \varphi_{0B}$ - потенциалы набегающего волнения, действующего на судно А и судно В соответственно:

$$\varphi_{0A} = -i \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{\cosh \mu_0(\zeta_A + h)}{\cosh \mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_A \cos \beta + \eta_A \sin \beta)};$$

$$\varphi_{0B} = -i \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{\cosh \mu_0(\zeta_B + h)}{\cosh \mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_B \cos \beta + \eta_B \sin \beta)} \quad (2)$$

Потенциалы Φ_A и Φ_B должны удовлетворять уравнению Лапласа, граничным условиям на свободной, смоченной поверхностях, на вертикальной стенке и на дне водоема. Граничные условия на смоченных поверхностях для каждого из потенциалов, входящих в выражения (1) и (2), имеют вид:

$$\frac{\partial \varphi_{jAA}}{\partial n} = n_{jA} + i \frac{U}{\omega_K} m_{jA}; \quad \frac{\partial \varphi_{jBA}}{\partial n} = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi_{jAB}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \varphi_{jBB}}{\partial n} = n_{jB} + i \frac{U}{\omega_K} m_{jB} \quad j = 1, 2, \dots, 6$$

$$\frac{\partial \varphi_{7AA}}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_{0A}}{\partial n}; \quad \frac{\partial \varphi_{7BA}}{\partial n} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi_{7AB}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \varphi_{7BB}}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_{0B}}{\partial n},$$

Граничные условия непротекания n_{jA}, n_{jB} имеют общий вид [9]:

$$n_1 = \cos(n, \xi); n_2 = \cos(n, \eta); n_3 = (n, \zeta);$$

$$n_4 = \eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta); n_5 = \zeta \cos(n, \xi) - \xi \cos(n, \zeta);$$

$$n_6 = \xi \cos(n, \eta) - \eta \cos(n, \xi)$$

$$m_j = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

$$m_5 = n_3;$$

$$m_6 = -n_2 \quad (4)$$

и должны выполняться соответственно на смоченной поверхности судна А и судна В.

Граничные условия на вертикальной стенке будут иметь вид:

$$\frac{\partial \Phi_A}{\partial \eta} = 0, \quad \eta \rightarrow H_q;$$

$$\frac{\partial \Phi_B}{\partial \eta} = 0, \quad \eta \rightarrow H_q \quad (5)$$

Для определения возмущающих сил задача сводится к определению потенциалов $\varphi_{7AA}, \varphi_{7BA}, \varphi_{7AB}, \varphi_{7BB}$, обусловленных дифрагированным волнением и гидродинамическим взаимодействием судов между собой и вертикальной стенкой.

Для ее решения используется теорема Грина и метод зеркальных отображений (рис.1) [2], [3], [8], согласно которой каждый из искомым дифракционных потенциалов можно представить следующим образом:

$$\varphi_{7AA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{7A}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) (G_{AA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{AAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A;$$

$$\varphi_{7BA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{7B}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BA}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BAq}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B;$$

$$\varphi_{7BB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{7B}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) (G_{BB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + G_{BBq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}, 2H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B})) dS_B;$$

$$\varphi_{7AB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{7A}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) (G_{AB}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + G_{ABq}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A})) dS_A; \quad (6)$$

где $G_{AA}, G_{AB}, G_{BA}, G_{BB}$ - функции Грина для пространственных пульсирующих источников, расположенных в точках с координатами $(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A})$ и $(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B})$ соответственно, $G_{AAq}, G_{ABq}, G_{BAq}, G_{BBq}$ - функции Грина, полученные в результате применения метода зеркального отображения. Именно за счет данных составляющих учитывается влияние вертикальной стенки.

Выражение для функции Грина может быть представлено согласно John в виде бесконечных рядов [6]:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \cosh \mu_0(\zeta + h) \cosh \mu_0(\zeta_1 + h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} (Y_0(\mu_0 R) - iJ_0(\mu_0 R)) + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + v^2) \cos \mu_k(\zeta + h) \cos \mu_k(\zeta_1 + h)}{(\mu_k^2 + v^2)h - v} K_0(\mu_k R), \quad (7)$$

где μ_k – положительные корни уравнения $\mu_k \tan \mu_k h + v = 0$

Неизвестные интенсивности потенциалов дифрагированного волнения определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sigma_{7A}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{7A}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left(\frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{Aq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1A}, 2H_{qA} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{7B}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) \left(\frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial G_{Bq}}{\partial n}(\xi_A, \eta_A, \zeta_A, \xi_{1B}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B}) \right) dS_B = -\frac{\partial \varphi_{0A}}{\partial n}; \\ & -\frac{1}{2} \sigma_{7B}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{7A}(\xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \left(\frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, \eta_{1A}, \zeta_{1A}) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial G_{Abq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1A}, H_{qA} + H_{qB} - \eta_{1A}, \zeta_{1A}) \right) dS_A \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{7B}(\xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) \left(\frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, \eta_{1B}, \zeta_{1B}) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial G_{Bbq}}{\partial n}(\xi_B, \eta_B, \zeta_B, \xi_{1B}, 2H_{qB} - \eta_{1B}, \zeta_{1B}) \right) dS_B = -\frac{\partial \varphi_{0B}}{\partial n}. \end{aligned} \quad (8)$$

Возмущающие силы и моменты находятся по формуле:

$$\begin{aligned} F_{Ai} &= -\rho i \omega_K e^{-i\omega_K t} \iint_{S_A} (\varphi_{0A} + \varphi_{7AA} + \varphi_{7BA}) n_i dS_A - \\ & - \rho e^{-i\omega_K t} U \iint_{S_A} \frac{\partial}{\partial \xi} (\varphi_{0A} + \varphi_{7AA} + \varphi_{7BA}) n_i dS_A \\ F_{Bi} &= -\rho i \omega_K e^{-i\omega_K t} \iint_{S_B} (\varphi_{0B} + \varphi_{7BB} + \varphi_{7AB}) n_i dS_B - \\ & - \rho e^{-i\omega_K t} U \iint_{S_B} \frac{\partial}{\partial \xi} (\varphi_{0B} + \varphi_{7BB} + \varphi_{7AB}) n_i dS_B \end{aligned} \quad (9)$$

При использовании трехмерной теории для определения действующих при совместной качке на каждое судно гидродинамических сил, система взаимосвязанных 12 уравнений качки судов будет иметь вид [4]:

$$\begin{aligned} & (M_1 + \lambda_{11aa}) \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{13aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{15aa} \ddot{\psi}_1 + \\ & + \mu_{11aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{13aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{15aa} \dot{\psi}_1 + \\ & + \lambda_{12aa} \ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{14aa} \ddot{\theta}_1 + \lambda_{16aa} \ddot{\chi}_1 + \\ & + \mu_{12aa} \dot{\eta}_{g1} + \mu_{14aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{16aa} \dot{\chi}_1 + \\ & + \lambda_{11ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{13ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{15ba} \ddot{\psi}_2 + \\ & + \mu_{11ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{13ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{15ba} \dot{\psi}_2 + \\ & + \lambda_{12ba} \ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{14ba} \ddot{\theta}_2 + \lambda_{16ba} \ddot{\chi}_2 + \\ & + \mu_{12ba} \dot{\eta}_{g2} + \mu_{14ba} \dot{\theta}_2 + \mu_{16ba} \dot{\chi}_2 = F_{A1} e^{-i\omega_K t}; \\ & (M_1 + \lambda_{22aa}) \ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{24aa} \ddot{\theta}_1 + \lambda_{26aa} \ddot{\chi}_1 + \\ & + \mu_{22aa} \dot{\eta}_{g1} + \mu_{24aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{26aa} \dot{\chi}_1 + \\ & + \lambda_{21aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{23aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{25aa} \ddot{\psi}_1 + \\ & + \mu_{21aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{23aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{25aa} \dot{\psi}_1 + \\ & + \lambda_{22ba} \ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{24ba} \ddot{\theta}_2 + \lambda_{26ba} \ddot{\chi}_2 + \\ & + \mu_{22ba} \dot{\eta}_{g2} + \mu_{24ba} \dot{\theta}_2 + \mu_{26ba} \dot{\chi}_2 + \\ & + \lambda_{21ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{23ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{25ba} \ddot{\psi}_2 + \\ & + \mu_{21ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{23ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{25ba} \dot{\psi}_2 = F_{A2} e^{-i\omega_K t}; \\ & (M_1 + \lambda_{33aa}) \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{31aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{35aa} \ddot{\psi}_1 + \\ & + \mu_{33aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{31aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{35aa} \dot{\psi}_1 + \\ & + \rho g S_1 \zeta_{g1} - \rho g S_1 X_{f1} \psi_1 + \lambda_{32aa} \ddot{\eta}_{g1} + \\ & + \lambda_{34aa} \ddot{\theta}_1 + \lambda_{36aa} \ddot{\chi}_1 + \mu_{32aa} \dot{\eta}_{g1} + \\ & + \mu_{34aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{36aa} \dot{\chi}_1 + \lambda_{33ba} \ddot{\xi}_{g2} + \\ & + \lambda_{31ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{35ba} \ddot{\psi}_2 + \mu_{33ba} \dot{\xi}_{g2} + \\ & + \mu_{31ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{35ba} \dot{\psi}_2 + \lambda_{32ba} \ddot{\eta}_{g2} + \\ & + \lambda_{34ba} \ddot{\theta}_2 + \lambda_{36ba} \ddot{\chi}_2 + \mu_{32ba} \dot{\eta}_{g2} + \\ & + \mu_{34ba} \dot{\theta}_2 + \mu_{36ba} \dot{\chi}_2 = F_{A3} e^{-i\omega_K t}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{xx1} + \lambda_{44aa})\ddot{\theta}_1 + \lambda_{42aa}\ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{46aa}\ddot{\chi}_1 + \mu_{44aa}\dot{\theta}_1 + \mu_{42aa}\dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{46aa}\dot{\chi}_1 + D_1 h_{01}\theta_1 + \lambda_{41aa}\ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{43aa}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{45aa}\ddot{\psi}_1 + \mu_{41aa}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{43aa}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{45aa}\dot{\psi}_1 + \lambda_{44ba}\ddot{\theta}_2 + \\
 & + \lambda_{42ba}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{46ba}\ddot{\chi}_2 + \mu_{44ba}\dot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{42ba}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{46ba}\dot{\chi}_2 + \lambda_{41ba}\ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{43ba}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{45ba}\ddot{\psi}_2 + \mu_{41ba}\dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{43ba}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{45ba}\dot{\psi}_2 = F_{A4}e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{yy1} + \lambda_{55aa})\ddot{\psi}_1 + \lambda_{51aa}\ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{53aa}\ddot{\zeta}_{g1} + \mu_{55aa}\dot{\psi}_1 + \mu_{51aa}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{53aa}\dot{\zeta}_{g1} + D_1 H_{01}\psi_1 - \rho g S_1 X_{f1}\zeta_{g1} + \\
 & + \lambda_{52aa}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{54aa}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{56aa}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{52aa}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{54aa}\dot{\theta}_1 + \mu_{56aa}\dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{55ba}\ddot{\psi}_2 + \lambda_{51ba}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{53ba}\ddot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{55ba}\dot{\psi}_2 + \mu_{51ba}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{53ba}\dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{52ba}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{54ba}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{56ba}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{52ba}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{54ba}\dot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{56ba}\dot{\chi}_2 = F_{A5}e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{zz1} + \lambda_{66aa})\ddot{\chi}_1 + \lambda_{62aa}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{64aa}\ddot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{66aa}\dot{\chi}_1 + \mu_{62aa}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{64aa}\dot{\theta}_1 + \\
 & + \lambda_{61aa}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{63aa}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{65aa}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{61aa}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{63aa}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{65aa}\dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{66ba}\ddot{\chi}_2 + \lambda_{62ba}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{64ba}\ddot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{66ba}\dot{\chi}_2 + \mu_{62ba}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{64ba}\dot{\theta}_2 + \\
 & + \lambda_{61ba}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{63ba}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{65ba}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{61ba}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{63ba}\dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{65ba}\dot{\psi}_2 = F_{A6}e^{-i\omega_k t}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{11bb})\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{13bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{15bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{11bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{13bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{15bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \lambda_{12bb}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{14bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{16bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{12bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{14bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{16bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{11ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{13ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{15ab}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{11ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{13ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{15ab}\dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{12ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{14ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{16ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{12ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{14ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{16ab}\dot{\chi}_1 = F_{B1}e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{22bb})\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{24bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{26bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{22bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{24bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{26bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{21bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{23bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{25bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{21bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{23bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{25bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \lambda_{22ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{24ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{26ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{22ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{24ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{26ab}\dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{21ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{23ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{25ab}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{21ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{23ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{25ab}\dot{\psi}_1 = F_{B2}e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{33bb})\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{31bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{35bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{33bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{31bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{35bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \rho g S_2 \zeta_{g2} - \rho g S_2 X_{f2}\psi_2 + \lambda_{32bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{34bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{36bb}\ddot{\chi}_2 + \mu_{32bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{34bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{36bb}\dot{\chi}_2 + \lambda_{33ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{31ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{35ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{33ab}\dot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \mu_{31ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{35ab}\dot{\psi}_1 + \lambda_{32ab}\ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{34ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{36ab}\ddot{\chi}_1 + \mu_{32ab}\dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{34ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{36ab}\dot{\chi}_1 = F_{B3}e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{xx2} + \lambda_{44bb})\ddot{\theta}_2 + \lambda_{42bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{46bb}\ddot{\chi}_2 + \mu_{44bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{42bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{46bb}\dot{\chi}_2 + D_2 h_{02}\theta_2 + \lambda_{41bb}\ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{43bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{45bb}\ddot{\psi}_2 + \mu_{41bb}\dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{43bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{45bb}\dot{\psi}_2 + \lambda_{44ab}\ddot{\theta}_1 + \\
 & + \lambda_{42ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{46ab}\ddot{\chi}_1 + \mu_{44ab}\dot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{42ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{46ab}\dot{\chi}_1 + \lambda_{41ab}\ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{43ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{45ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{41ab}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{43ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{45ab}\dot{\psi}_1 = F_{B4} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{yy2} + \lambda_{55bb})\ddot{\psi}_2 + \lambda_{51bb}\ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{53bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \mu_{55bb}\dot{\psi}_2 + \mu_{51bb}\dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{53bb}\dot{\zeta}_{g2} + D_2 H_{02}\psi_2 - \rho g S_2 X_{f2}\zeta_{g2} + \\
 & + \lambda_{52bb}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{54bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{56bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{52bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{54bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{56bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{55ab}\ddot{\psi}_1 + \lambda_{51ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{53ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \mu_{55ab}\dot{\psi}_1 + \mu_{51ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{53ab}\dot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{52ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{54ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{56ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{52ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{54ab}\dot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{56ab}\dot{\chi}_1 = F_{B5} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{zz2} + \lambda_{66bb})\ddot{\chi}_2 + \lambda_{62bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{64bb}\ddot{\theta}_2 + \mu_{66bb}\dot{\chi}_2 + \mu_{62bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{64bb}\dot{\theta}_2 + \lambda_{61bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{63bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{65bb}\ddot{\psi}_2 + \mu_{61bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{63bb}\dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{65bb}\dot{\psi}_2 + \lambda_{66ab}\ddot{\chi}_1 + \lambda_{62ab}\ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{64ab}\ddot{\theta}_1 + \mu_{66ab}\dot{\chi}_1 + \mu_{62ab}\dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{64ab}\dot{\theta}_1 + \lambda_{61ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{63ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{65ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{61ab}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{63ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{65ab}\dot{\psi}_1 = F_{B6} e^{-i\omega_k t}
 \end{aligned} \tag{10}$$

где S_n -площади действующих ватерлиний; D_n -весовые водоизмещения судов, M_n -массы судов, h_{0n}, H_{0n} -поперечная и продольная метацентрические высоты ; $J_{xxn}, J_{yy n}, J_{zzn}$ -центральные моменты инерции первого и второго судов; X_{fn} -абсциссы центров тяжести площадей ватерлиний. Все коэффициенты присоединенных масс определены авторами в работе [5]. Решение системы (2.64) будем искать в виде [4] :

$$\begin{aligned}
 \xi_{gn} &= \xi_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\xi n}) \\
 \eta_{gn} &= \eta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\eta n}) \\
 \zeta_{gn} &= \zeta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\zeta n}) \\
 \theta_n &= \theta_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\theta n}) \\
 \psi_n &= \psi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\psi n}) \\
 \chi_n &= \chi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\chi n}), \\
 n &= 1, 2
 \end{aligned} \tag{11}$$

Анализ результатов

На основании изложенного метода была разработана программа расчета совместной качки двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке. В таблице 1 приведены основные характеристики судов, для которых проводились расчеты возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик

Таблица 1

Таблица основных характеристик судов

Тип/ Название судна	L	B	T	δ	α
Лихтеровоз "Алексей Косыгин"	232	32	10.6	0.57	0.82
Танкер "Баскунчак"	74	12.0	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

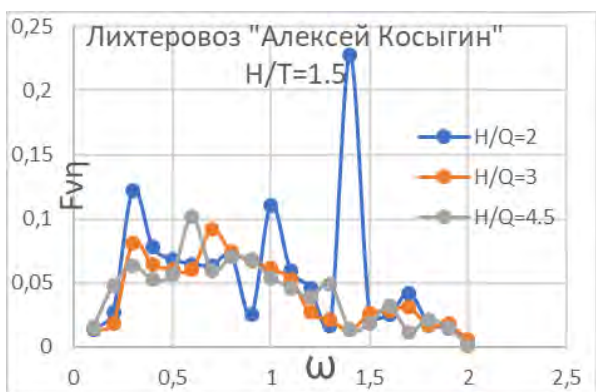


Рис. 1. Значения горизонтальной возмущающей силы, возникающие при качке двух судов «Алексей Косыгин» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1.5$

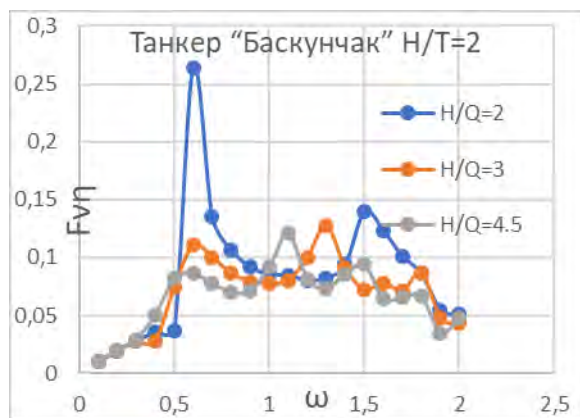


Рис. 4. Значения горизонтальной возмущающей силы, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=2$

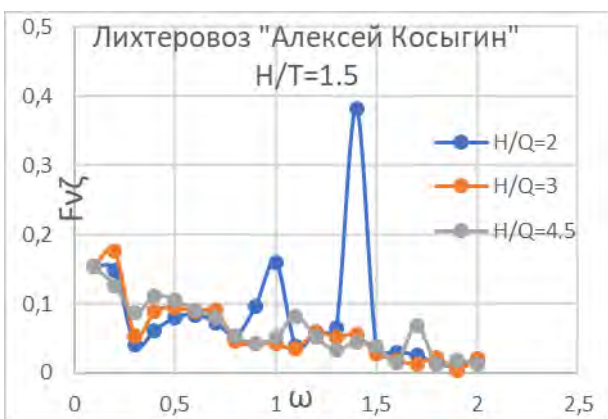


Рис. 2. Значения вертикальной возмущающей силы, возникающие при качке двух судов «Алексей Косыгин» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1.5$



Рис. 5. Значения вертикальной возмущающей силы, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=2$

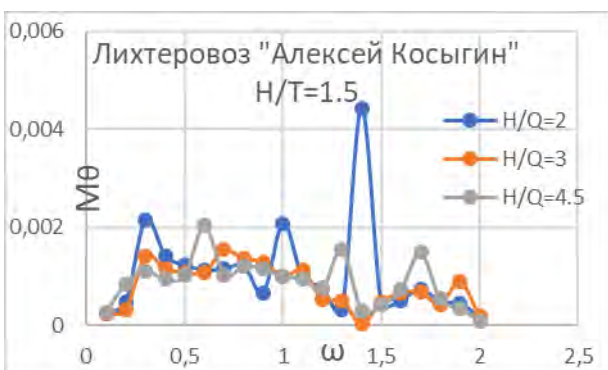


Рис. 3. Значения бортового возмущающего момента, возникающие при качке двух судов «Алексей Косыгин» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1.5$

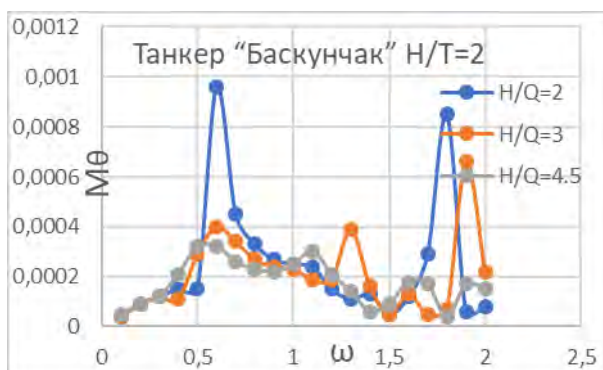


Рис. 6. Значения бортового возмущающего момента, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=2$

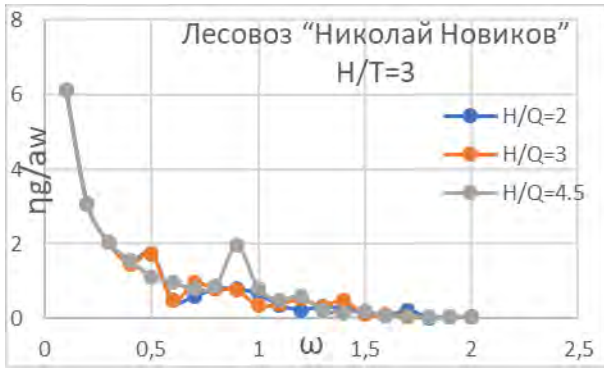


Рис. 7. Значения АЧХ поперечно-горизонтальной качки, возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=3$



Рис. 10. Значения АЧХ поперечно-горизонтальной качки, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1,5$

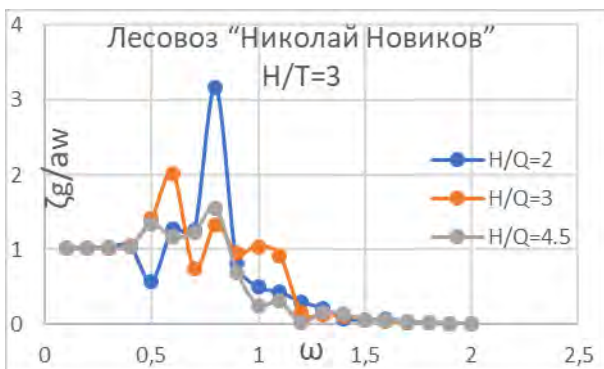


Рис. 8. Значения АЧХ вертикальной качки, возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=3$



Рис. 11. Значения АЧХ вертикальной качки, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1,5$

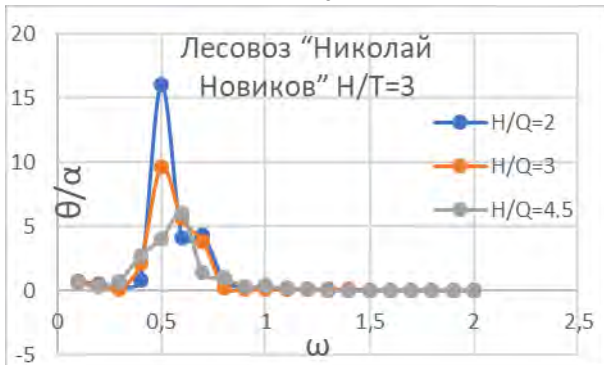


Рис. 9. Значения АЧХ бортовой качки, возникающие при качке двух судов «Николай Новиков» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=3$

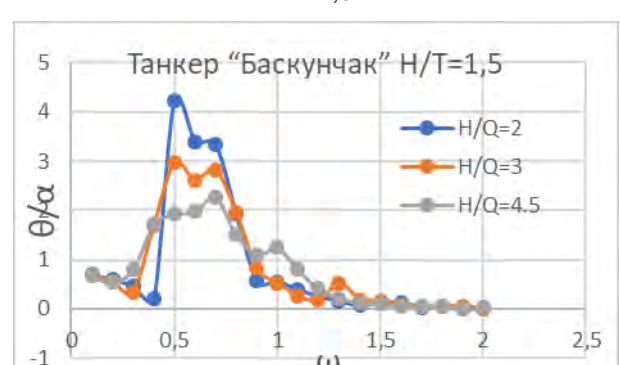


Рис. 12. Значения АЧХ бортовой качки, возникающие при качке двух судов «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке в зависимости от изменения расстояний до нее и между судами при $H/T=1,5$

На рис.1-6 представлены результаты расчетов возмущающих сил и моментов, возникающих при совместной качке двух одинаковых судов параллельно вертикальной стенке лагом к волнению. При выполнении расчетов учитывалось совместное влияние изменения относительных расстояний между судами и стенкой $Hq/B/2$ и между самими судами $D/B/2$. При этом расчеты проводились при равенстве относительных расстояний до стенки и между судами $Hq/B/2=D/B/2=H/Q$ и различных значений относительной глубины H/T .

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что для графиков зависимостей горизонтальных и вертикальных возмущающих сил и моментов от частоты характерно наличие «пиков», обусловленных взаимодействием вертикальной стенки и двух судов между собой. Наибольшие значения в области «пиков» имеют возмущающие силы и моменты при сочетании наименьших относительных расстояний между судами и между судами и стенкой. Так, значения всех возмущающих сил и моментов для танкера «Баскунчак» на частоте волнения $\omega=0,6$ и $H/Q=2$ в 2.5-3 раза больше соответствующих значений при $H/Q=4$ (рис.4-6). Также характерно смещение максимальных амплитудных значений возмущающих сил и моментов в область высоких частот при уменьшении расстояний между объектами (рис.1-6)

На рис.7-12 приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки для лесовоза «Николай Новиков» и танкера «Баскунчак». Из приведенных результатов видно, что изменение расстояния между судами и судами и вертикальной стенкой практически не влияет на амплитуды поперечно-горизонтальной качки (рис.7,10). В диапазоне частот $\omega < 0,6$ значения амплитуд при разных расстояниях полностью совпадают между собой. В большинстве случаев расчета вертикальной и бортовой качки как для первого судна так и для второго наблюдается увеличение значений амплитуд при уменьшении расстояний между объектами (рис.8,9,11,12). Так, для лесовоза «Николай Новиков» характерно двукратное увеличение амплитуды вертикальной качки при $H/Q=2$ по сравнению с $H/Q=4,5$ на частоте $\omega=0,8$ (рис.8), а для танкера «Баскунчак» такое же двукратное увеличение бортовой качки на частоте $\omega=0,5$ (рис.12). Однако, в ряде случаев, из-за учета вязкостного демпфирования по эмпирическим формулам в случае расчета бортовой качки и ее взаимосвязи с вертикальной, указанная выше зависимость от изменения расстояния может нарушаться.

На рис.13-18 представлены результаты расчетов амплитудных значений возмущающих сил и моментов, выполненных для различных стесненных фарватеров, а именно:

1. При качке судна на мелководье [1];
2. При качке судна на мелководье параллельно вертикальной стенке [4];
3. При качке двух судов на мелководье [2],[3];
4. При качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке.

Приведенные зависимости показывают, что влияние стенки на судно, судна на судно и

совместное влияние стенки и второго судна приводят к наличию «пиков» зависимостей возмущающих сил и моментов от частоты. Зависимости возмущающих сил и моментов, полученные при качке судна на мелководье представляют собой гладкие кривые и не имеют пиков.

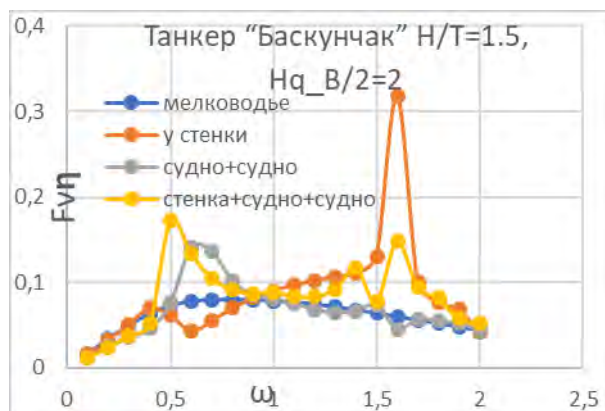


Рис. 13. Значения возмущающих горизонтальных сил, возникающие при качке судна «Баскунчак» в различных стесненных фарватерах.

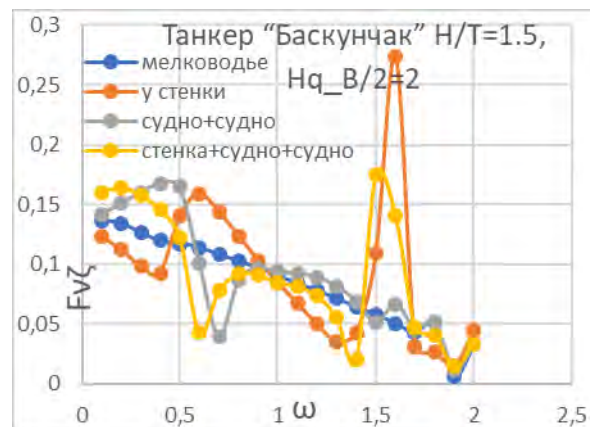


Рис. 14. Значения возмущающих вертикальных сил, возникающие при качке судна «Баскунчак» в различных стесненных фарватерах.

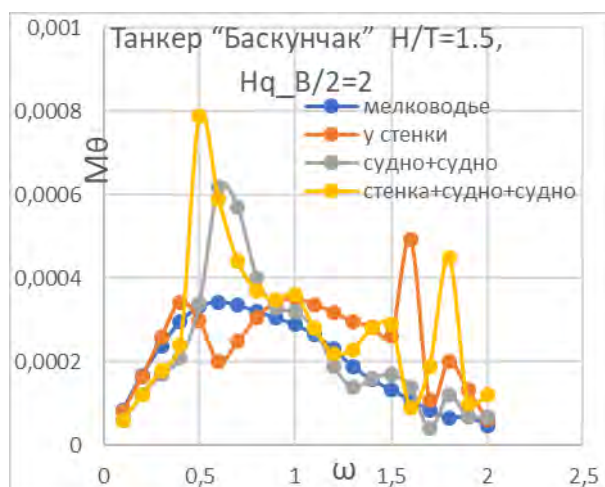


Рис. 15. Значения возмущающих бортовых моментов, возникающие при качке судна «Баскунчак» в различных стесненных фарватерах.

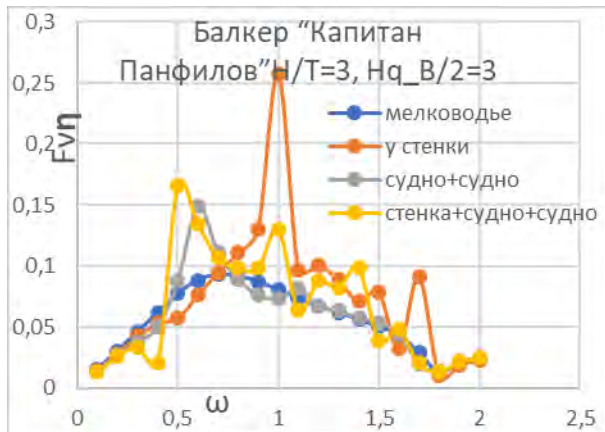


Рис. 16. Значения возмущающих горизонтальных сил, возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах

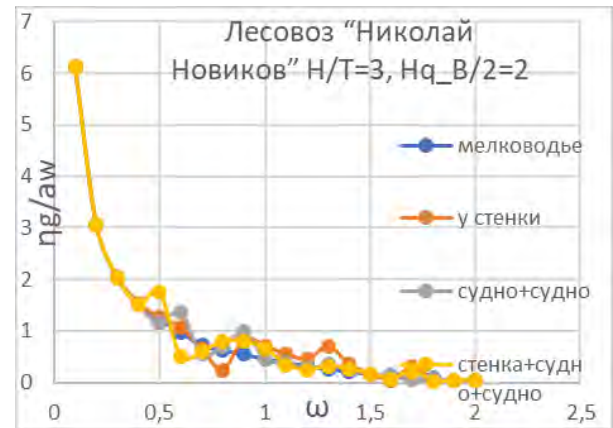


Рис. 19. АЧХ поперечно-горизонтальной качки, возникающие при качке судна «Николай Новиков» в различных стесненных фарватерах (H/T=3, Hq_V/2=2).

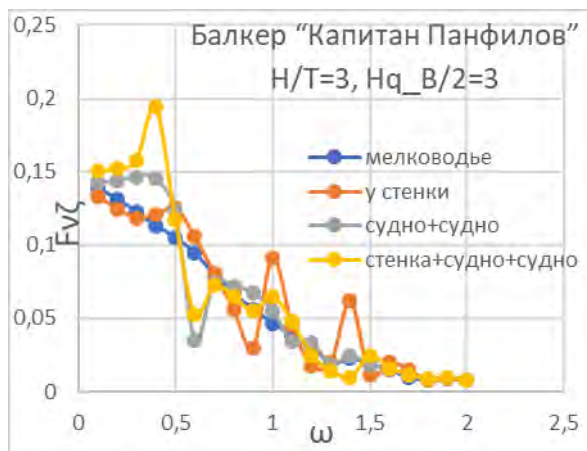


Рис. 17. Значения возмущающих вертикальных сил, возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах

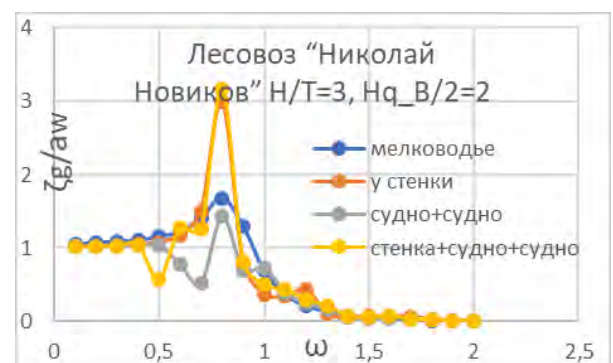


Рис. 20. АЧХ вертикальной качки, возникающие при качке судна «Николай Новиков» в различных стесненных фарватерах (H/T=3, Hq_V/2=2).

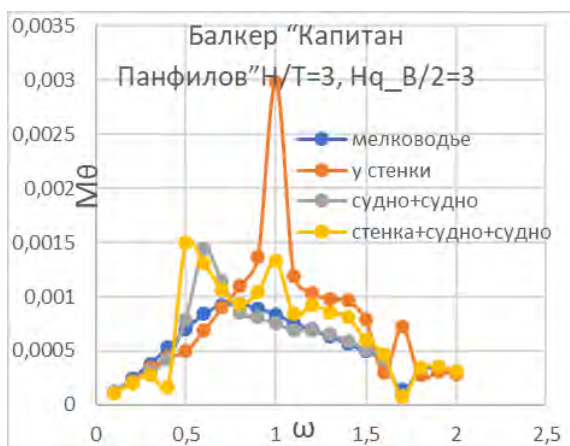


Рис. 18. Значения возмущающих бортовых моментов, возникающие при качке судна «Капитан Панфилов» в различных стесненных фарватерах

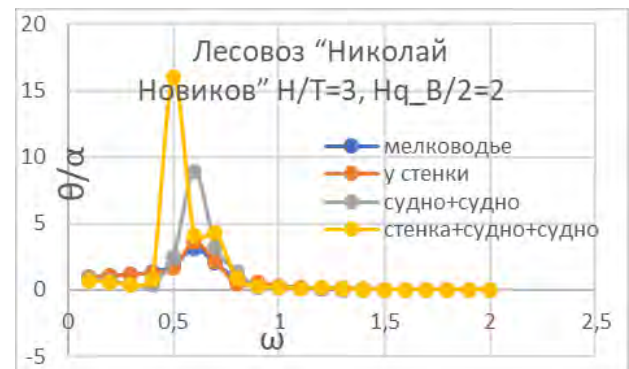


Рис. 21. АЧХ бортовой качки, возникающие при качке судна «Николай Новиков» в различных стесненных фарватерах (H/T=3, Hq_V/2=2).

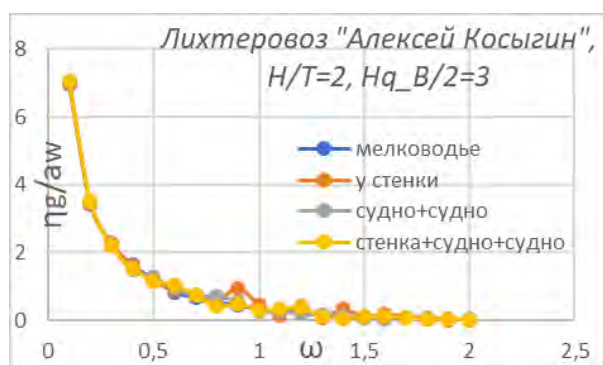


Рис. 22. АЧХ поперечно-горизонтальной качки, возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах ($H/T=2, Hq_V/2=3$)

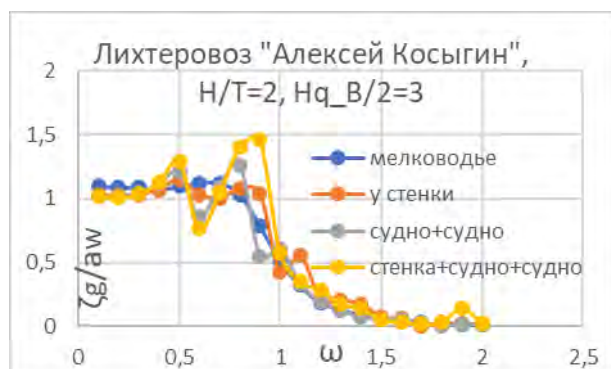


Рис. 23. АЧХ вертикальной качки возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах $H/T=2, Hq_V/2=3$)

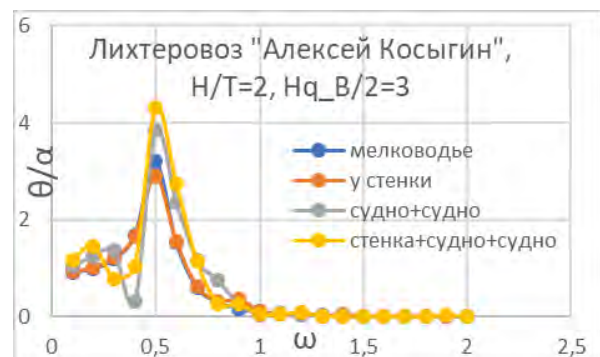


Рис. 24. АЧХ вертикальной качки, возникающие при качке судна «Алексей Косыгин» в различных стесненных фарватерах $H/T=2, Hq_V/2=3$)

Возмущающие силы и моменты имеют максимальные значения при совместной качке двух судов параллельно вертикальной стенке (рис.15,17) и в ряде случаев при качке одного судна параллельно вертикальной стенке (рис.13,16,18). Наименьшие значения возмущающие силы и моменты имеют место при качке на мелководье. Так,

значения возмущающего момента при бортовой качке двух танкеров «Баскунчак» параллельно вертикальной стенке на частоте $\omega=0,5$ в 2,5 раза больше соответствующего момента при качке танкера на мелководье. (рис.15). Аналогичные двух, трехкратные превышения значений наблюдаются и для горизонтальных и вертикальных возмущающих сил (рис.13,16).

В области высоких частот $\omega>1,5$, значения возмущающих сил и моментов, полученные для различных фарватеров, практически совпадают между собой.

На рис.19-24 приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик, вычисленных для тех же фарватеров. Анализ полученных результатов показывает, что амплитудно-частотные характеристики поперечно-горизонтальной качки практически совпадают между собой, независимо от вида фарватера и типа судна (рис.19,22). Наибольшее влияние гидродинамического взаимодействия имеет место при расчетах амплитуд вертикальной и бортовой качки. Для амплитудно-частотных характеристик вертикальной качки, имеющих место при качке судна параллельно вертикальной стенке, при совместной качке судов и при качке двух судов параллельно вертикальной стенке характерно наличие нескольких «пиков» (рис.23). Максимальные значения наблюдаются в большинстве случаев при качке двух судов параллельно вертикальной стенке, а также при качке одного судна параллельно стенке (рис.20). Наименьшие значения амплитуд вертикальной качки имеют место при качке судна на мелководье.

Наибольшие амплитуды бортовой качки имеют место в случае совместной качки двух судов на мелководье и в случае совместной качки двух судов параллельно вертикальной стенке, что не противоречит расчетам, выполненным в работе Lim [7]. Для ряда судов можно отметить многократное увеличение безразмерных амплитуд при бортовой качке двух судов параллельно вертикальной стенке по сравнению с достигаемыми амплитудами при бортовой качке на мелководье. (рис.21).

Заключение

Проведенные расчеты возмущающих сил и амплитудно-частотных характеристик, возникающих при качке двух судов параллельно вертикальной стенке, показали значительное влияние совместного изменения расстояний между судами и судами и вертикальной стенкой и необходимость его учета.

В дальнейшем разработанный метод может быть использован для расчетов сил волнового дрейфа, а также для расчетов амплитуд качки в стесненном фарватере в условиях нерегулярного волнения.

Литература

1. Семенова В.Ю. Тан Хтун Аунг (2010) Определение амплитуд качки судна в условиях мелководья на основании трехмерной теории Журнал Фундаментальная и прикладная ГИДРОФИЗИКА, N2 (8)
2. Семенова В. Ю., АунгМьютхант (2016) Определение возмущающих сил, возникающих при совместной качке двух судов на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, N 2(32) T1. стр.27-35
3. Семенова В.Ю., АунгМьютхант (2016) Расчеты амплитудно-частотных характеристик при совместной качке двух судов на регулярном волнении в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии, N 4(34), стр.76-86

4. Семенова В.Ю., Со Мое Аунг (2012) Исследование влияния вертикальной стенки на гидродинамические характеристики судна при его качке на мелководье Морские интеллектуальные технологии N 3(17), стр.41-45
5. Семенова В.Ю., Баканов К.И.(2021) . Определение коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов на мелководье параллельно вертикальной стенке. Морские интеллектуальные технологии, N1, т.2, стр.16-26
6. John F.(1950) On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., v. 3, p. 45-101.
7. Lim S.H.(2007) Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations . Thesis, Texas University.
8. Oortmerssen G. (1976)The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, vol.3, n4
9. Oortmerssen G. (1979)Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves. Proc. 2 ndInt.conf on the behavior of off-shore structures, London, pp.339-356

References

1. Semenova V.Ju. Tan Htun Aung (2010) Opredelenie amplitud kachki sudna v uslovijah melkovod'ja na osnovanii trehmernoj teorii [Determination of the amplitude of the ship's motions in shallow water conditions based on the three-dimensional theory] Zhurna I Fundamental'naja i prikladnaja GIDROFIZIKA, N2 (8)
2. Semenova V. Yu., AungM'oTkhand (2016) Opredelenie vozmushchayushchikh sil, voznikayushchikh pri sovmestnoy kachke dvukh sudov na melkovod'e. [The determination of the exciting forces during the joint motions of two ships in shallow water] Morskie intellektual'nye tekhnologii, N 2(32) T1. str.27-35
3. Semenova V.Yu., AungM'oTkhand (2016) Raschety amplitudno-chastotnykh kharakteristik pri sovmestnoy kachke dvukh sudov na regul'yarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya. [The calculations of the response amplitude operators in the coupled of the ships on the regular waves in the shallow water] Morskie intellektual'nye tekhnologii, N 4(34), str.76-86
4. Semenova V.Yu., So Moe Aung (2012) Issledovanie vliyaniya vertikal'noy stenk ina gidrodinamicheskie kharakteristiki sudna pri ego kachke na melkovod'e [The investigation of the effects of vertical quay wall on the hydrodynamics characteristics of the ship oscillating in shallow water] Morskieintellektual'nyetekhnologii N 3(17), str.41-45
5. Semenova V.Yu., Bakanov K.I. (2021). Opredelenie koeffitsientov prisoedinennykh mass i dempfirovaniya pri sovmestnoy kachke dvukh sudov na melkovod'e paralel'no vertikal'noy stenke [Determination of the added masses and damping coefficients during coupled motions of two ships in shallow water parallel to the vertical wall]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N1, t.2, str.16-26
6. John F. (1950) On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., v. 3, p. 45-101.
7. Lim S.H. (2007) Global performance analysis of a floating harbor and a container ship for loading and offloading operations. Thesis, Texas University.
8. Oortmerssen G. (1976) The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, vol.3, n4
9. Oortmerssen G. (1979) Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves. Proc. 2 ndInt.conf on the behavior of off-shore structures, London, pp.339-356

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. Лоцманская, 10, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

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

Кирилл Игоревич Баканов, Студент (Магистр), Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

Kirill I. Bakanov, Student (Master), State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 10, St.Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 629.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.033>

О разработке проекта требований правил Регистра Судоходства в части ограничений слеминга и оголения винта

Р.В. Борисов¹ e-mail: rv2borisov@mail.ru, А.А. Лузянин¹ e-mail: luzianin52@mail.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Настоящая статья является третьей из цикла статей, посвященных корректировке кодекса ИМО по остойчивости в части ограничений продольной качки. В ней рассмотрены подходы к ограничениям по погоде из условий, возникающих при продольной качке для судов различных типов и предложены критерии оценки этих явлений на нерегулярном волнении разной интенсивности.

На основании выполненных систематических расчетов продольной качки на нерегулярном волнении получены зависимости вероятности слеминга и оголения винта от скорости и интенсивности волнения для транспортных судов. Полученные формулы позволяют оценить указанные показатели мореходности. При этом ставится цель расширения нормативной базы для обоснованного назначения эксплуатационных ограничений по погоде и району плавания судов при совершенствовании Правил Российского Морского Регистра Судоходства на основе общего подхода к нормированию мореходности, согласующегося с методикой разработки новой Международной конвенции о грузовой марке 2000.

Предлагаемый подход к определению дополнительных критериев мореходности для оценки эксплуатационных ограничений судов по погоде из условий мореходности может быть использован на практике для совершенствования нормативных требований Регистра.

Ключевые слова: критерии и показатели мореходности, продольная качка, нерегулярное волнение, интенсивность волнения, ограничения продольной качки, правила Морского Регистра судоходства РФ, амплитуды вертикальной качки, амплитуды килевой качки, дополнительное сопротивление на волнении, вероятность слеминга, вероятность оголения винта

On the development of the draft requirements of the rules of the Register of Shipping in terms of restrictions on slewing and exposing the screw

Rudolf V. Borisov e-mail: rv2borisov@mail.ru, Aleksandr A. Luzyanin e-mail: luzianin52@mail.ru

¹Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Annotation. This article is the third in a series of articles devoted to the adjustment of the IMO stability code in terms of pitching limitations. It considers approaches to weather restrictions based on the conditions arising during pitching for ships of various types and proposes criteria for assessing these phenomena on irregular waves of different intensities.

Based on the performed systematic calculations of pitching on irregular waves, the dependences of the probability of slamming and propeller bareness on the speed and intensity of waves for transport vessels were obtained. The formulas obtained make it possible to evaluate the indicated seaworthiness indicators. At the same time, the goal is to expand the regulatory framework for the justified assignment of operational restrictions on the weather and the area of navigation of ships while improving the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping on the basis of a general approach to the regulation of seaworthiness, consistent with the methodology for the development of a new International Convention on Load Mark 2000

The proposed approach to the definition of additional seaworthiness criteria for assessing the operational limitations of ships by weather based on seaworthiness conditions can be used in practice to improve the regulatory requirements of the Register.

Key words criteria and indicators of seaworthiness, pitching, irregular waves, wave intensity, pitching restrictions, rules of the Maritime Register of Shipping of the Russian Federation, heaving amplitude, pitching amplitude, additional resistance on waves, probability of slamming, probability of propeller exposure

Введение

Усилившаяся в настоящее время тенденция к выходу речных судов в море и расширению районов их эксплуатации (в том числе с переходом к международным рейсам) привела к нарушению сбалансированной системы назначения этим судам ограничений по району плавания и допустимой интенсивности волнения. Среди основных причин такого нарушения следует назвать формальное использование указанных особенностей этих судов при их переоборудовании, сводящееся к удовлетворению возрастающих требований к прочности корпуса и реализации имеющихся запасов по основным критериям остойчивости (в том числе по критерию погоды K). При этом специальные вопросы мореходности остаются за рамками рассмотрения,

поскольку в существующей практике нормирования отсутствуют соответствующие критерии.

На кафедре теории корабля ГМТУ были выполнены систематические расчеты показателей мореходности для транспортных судов на нерегулярном волнении разной интенсивности, [1,2]. В настоящей третьей статье рассмотрены следующие показатели мореходности: слеминг и оголение гребного винта.

Расчеты выполнены по разработанной программе для «базового» судна [2] для трех значений числа $Fr = 0; 0,14$ и $0,28$ на волнении различной интенсивности. Характеристики судна менялись в следующих пределах: коэффициент общей полноты, δ , $0,574 \div 0,820$; коэффициент полноты ватерлинии, α , $0,606 \div 0,857$; отношение L/B $5,6 \div 8,4$; отношение B/T $3,49 \div 4,98$.

1. Оценка вероятности слеминга на встречном нерегулярном волнении

Считается, что вероятность слеминга равна вероятности совпадения двух событий: оголения

ударов за время T_0 получим:

$$N_{уд}(T_0) = \frac{\bar{\omega}_q T_0}{2\pi} \exp \left[- \left(\frac{T_1^2}{2D_{q3}} + \frac{v_c^2}{2D_{q3}} \right) \right], \quad (1)$$

где T_1 – расчетная осадка в зоне удара в районе 3-го теоретического шпангоута;

$\bar{\omega}_q$ – средняя частота относительных колебаний волнового уровня,

$D_q = \int_0^\infty \left| \frac{q_3(\omega)}{r_0(\omega)} \right|^2 S_\zeta(\omega) d\omega$, $D_q = \int_0^\infty \left| \frac{q_3(\omega)}{r_0(\omega)} \right|^2 \omega^2 S_\zeta(\omega) d\omega$ – дисперсии амплитуд и скоростей относительных колебаний волнового уровня на третьем теоретическом шпангоуте,

$\frac{q_3(\omega)}{r_0(\omega)}$ – амплитудно-частотные характеристики колебаний волнового уровня на третьем теоретическом шпангоуте, [3,4,5,6].

$r_0(\omega)$ – амплитуда волны частотой ω .

Пороговая скорость относительного движения днища и волны, ниже которой слеминг не наблюдается, определяется по формуле:

$$v_c = 0,093\sqrt{gL}. \quad (2)$$

Вероятность слеминга определяется выражением:

$$P_c = \exp \left[- \left(\frac{T_1^2}{2D_{q3}} + \frac{v_c^2}{2D_{q3}} \right) \right], \quad (3)$$

В качестве расчетного частотного спектра реального морского волнения принят спектр,

днища и превышения определенного порогового значения v_c скоростью относительных колебаний в момент входа днища в воду. Используя соотношение для оценки среднего числа превышений процессом $q(t)$ уровня $T(x)$ при скорости более v_c , для среднего числа состоящий из суммы двух спектров, один из которых, определяет волнение в зоне максимума и высоко-частотной зоне, а второй – в зоне низких частот, рекомендованный [3,4].

Для полного описания спектра достаточно определить два параметра, соответствующие заданной интенсивности волнения дисперсию ординат волн и их средний период. Для вычисления дисперсии используется зависимость: $D_\zeta = 0,0358h_{3\%}^2$. Для развитого волнения средний период волнения принят $\bar{\tau} = 3,3\sqrt{h_{3\%}}$. Здесь $h_{3\%}$ – высота волн 3%-ой обеспеченности.

На рис. 1 точками нанесены результаты расчета по разработанной программе вероятность слеминга на встречном нерегулярном волнении для «базового» судна в зависимости от относительной длины нерегулярных волн $\bar{\lambda} = \lambda_c/L$, при различной относительной скорости $Fr = \frac{v_0}{\sqrt{gL}}$. Здесь – $\lambda_c = 1,56\bar{\tau}^2$

– средняя длина нерегулярных волн заданной интенсивности. На этом же рисунке линиями нанесены зависимости, рассчитанные по аппроксимирующей формуле (4). Видно, что полученные приближенные формулы удовлетворительно согласуются с «точным» решением.

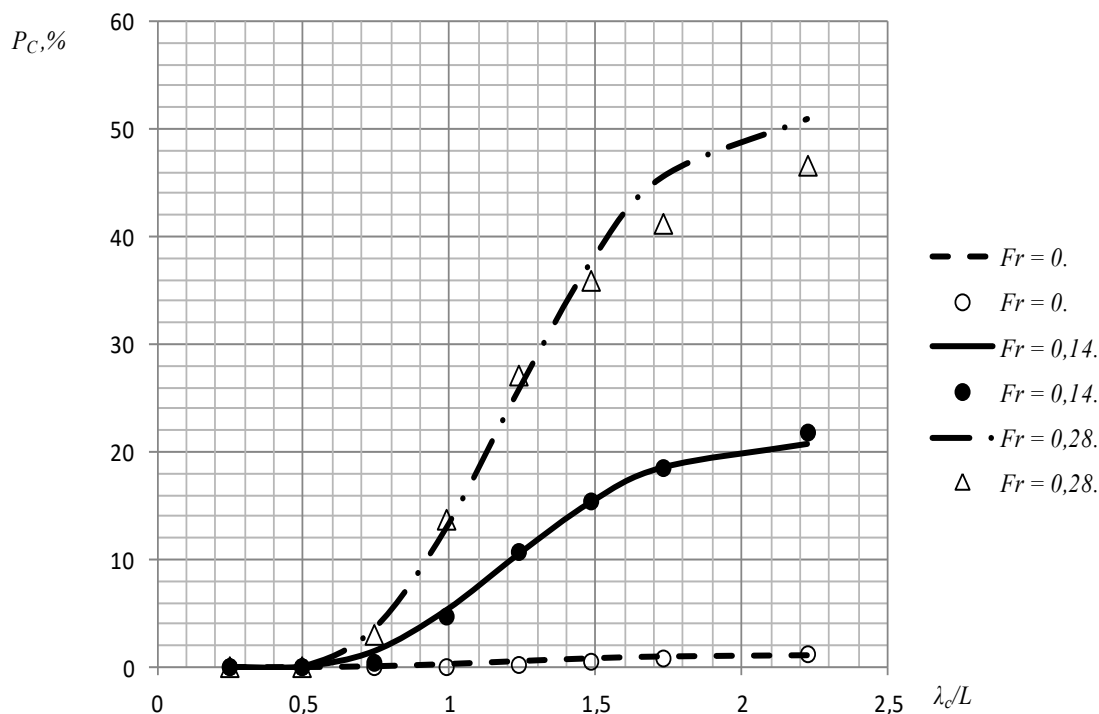


Рис. 1. Вероятность слеминга судна на нерегулярном волнении в зависимости от скорости. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$

$$P_c = \kappa_{Pc(L/B)} \kappa_{Pc(B/T)} \kappa_{Pc\delta} \kappa_{Pc\alpha} (290Fr^2 + 90Fr + 1) \left[1 - e^{-18(0,059\bar{\lambda} - \kappa_{Pc(L/B)} \kappa_{Pc(B/T)})^{2,4}} \right], \quad (4)$$

здесь: $K_{PC(L/B)1}$, $K_{PC(L/B)2}$, $K_{PC(B/T)1}$, $K_{PC(B/T)2}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на вероятность слеминга;

$K_{PC\delta}$, $K_{PC\alpha}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов общей полноты δ и полноты площади ватерлинии α на вероятность слеминга.

На рис. 2–5 показано как меняется вероятность слеминга при изменении относительной длины судна, коэффициентов полноты ватерлинии и общей полноты и отношения B/T . На этих же рисунках приведены расчеты по приближенной формуле (4) с учетом поправочных коэффициентов $K_{PC(L/B)1}$, $K_{PC(L/B)2}$, $K_{PC(B/T)1}$, $K_{PC(B/T)2}$ и $K_{PC\delta}$, $K_{PC\alpha}$ (5), (6), (7), (8), (9), (10).

$$K_{PC(L/B)1} = 0,107 \frac{L}{B} + 0,28. \quad (5)$$

$$K_{PC(L/B)2} = 0,005 \left(12 - \frac{L}{B} \right). \quad (6)$$

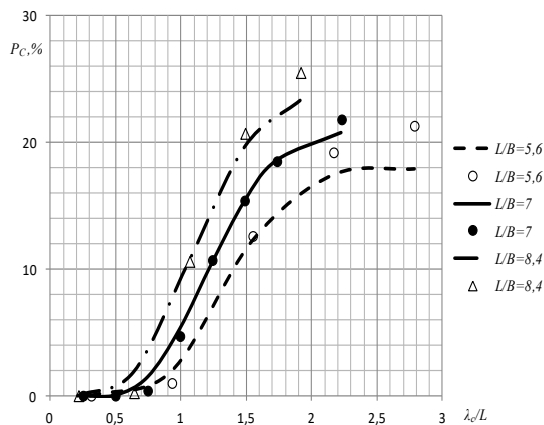


Рис. 2. Вероятность слеминга судна на нерегулярном волнении в зависимости от L/B . $Fr=0,14$; $\delta=0,700$; $\alpha=0,782$; $B/T=2,5$

$$K_{PC\alpha} = 0,25\alpha^{-5}. \quad (7)$$

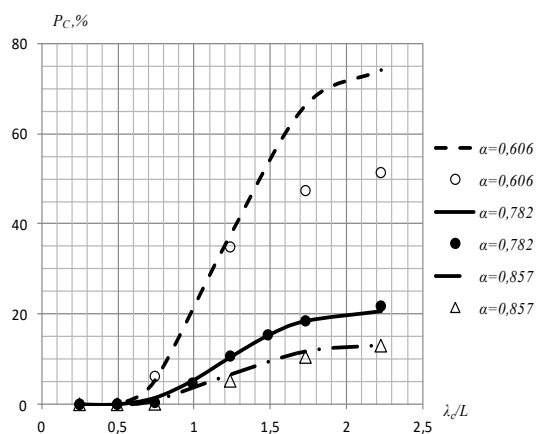


Рис. 3. Вероятность слеминга судна на нерегулярном волнении в зависимости от α . $Fr=0,14$; $\delta=0,700$; $L/B=7$; $B/T=2,5$

$$K_{PC\delta} = 0,015e^{6,3\delta}. \quad (8)$$

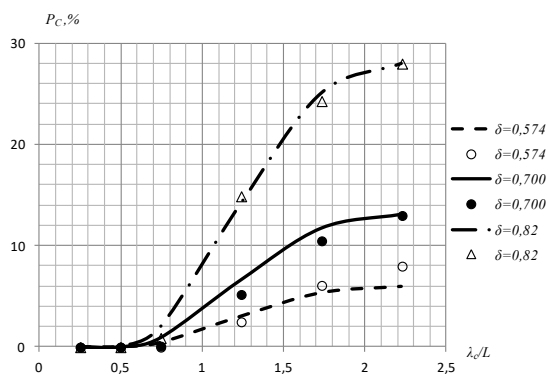


Рис. 4. Вероятность слеминга судна на нерегулярном волнении в зависимости от δ . $Fr=0,14$; $\alpha=0,782$; $L/B=7$; $B/T=2,5$

$$Fr=0,14; \alpha=0,782; L/B=7; B/T=2,5$$

$$K_{PC(B/T)1} = 1 + 1,45 \left(\frac{B}{T} - 2,5 \right)^{0,45}. \quad (9)$$

$$K_{PC(B/T)2} = \frac{2,5}{(B/T)}. \quad (10)$$

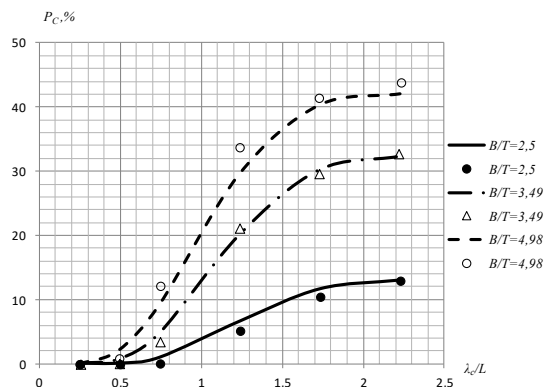


Рис. 5. Вероятность слеминга судна на нерегулярном волнении в зависимости от B/T . $Fr=0,14$; $\delta=0,699$; $\alpha=0,782$; $L/B=7$

$$Fr=0,14; \delta=0,699; \alpha=0,782; L/B=7$$

2. Оценка вероятности оголения гребного винта на встречном нерегулярном волнении

Вероятность оголения винта определяется зависимостью [4]:

$$P_0 = \exp\left(-\frac{T_B^2}{2D_{q21}}\right), \quad (11)$$

где $T_B = 0,5T$ – величина расчетного оголения винта ($0,3D_B$); D_{q21} – дисперсия амплитуд колебаний уровня воды на 21 теоретическом шпангоуте с учетом динамических эффектов, рассчитывается, используя понятие о передаточной функции:

$$D_{q21} = \int_0^\infty \left| \frac{q_{21}(\omega)}{r_0(\omega)} \right|^2 S_\zeta(\omega) d\omega. \quad (12)$$

На рис.6 приведены результаты расчетов вероятности оголения винта на встречном нерегулярном волнении для «базового» судна при различной относительной скорости по разработанной программе (обозначены точками) и по приближенной формуле (13).

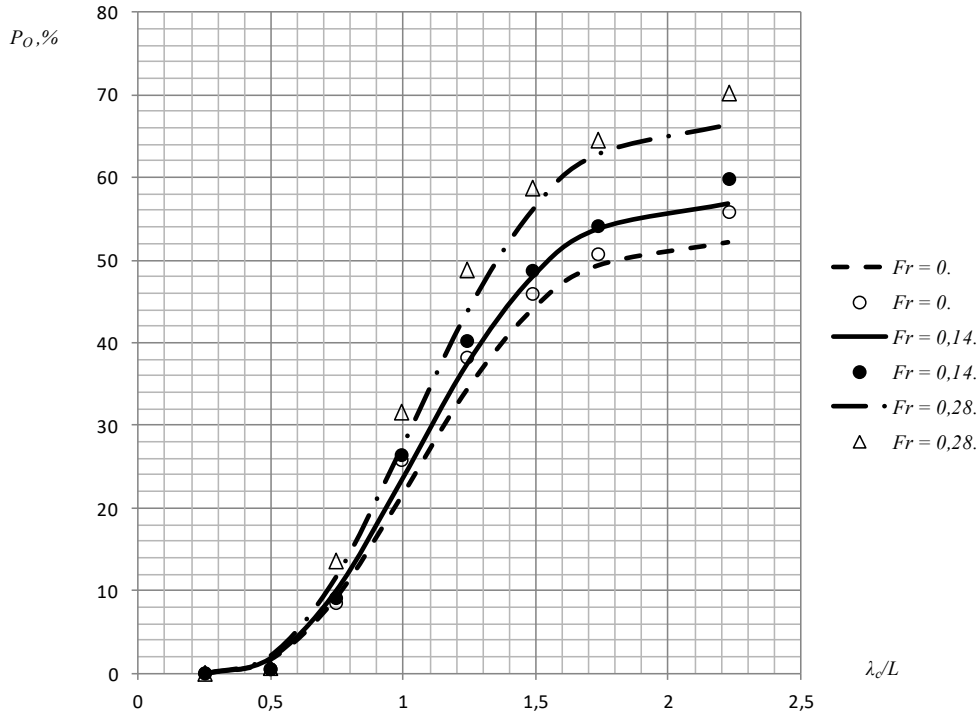


Рис.6. Вероятность оголения винта в зависимости от скорости.

$\delta = 0,700; \alpha = 0,782; L/B = 7,0; B/T = 2,5$

$$P_0 = \kappa_{P_0(L/B)1} \kappa_{P_0(B/T)1} \kappa_{P_0\alpha} \kappa_{P_0\delta} (128Fr^2 + 18Fr + 55) \left[1 - e^{-18(0,059\bar{\lambda} - \kappa_{P_0(L/B)2} \kappa_{P_0(B/T)2})^{2,4}} \right], \quad (13)$$

Здесь $\kappa_{P_0(L/B)1}$, $\kappa_{P_0(B/T)1}$, $\kappa_{P_0(L/B)2}$, $\kappa_{P_0(B/T)2}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на вероятность оголения винта; $\kappa_{P_0\delta}$, $\kappa_{P_0\alpha}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов полноты δ и α на вероятность оголения винта.

На рис. 7–10 сопоставлены результаты расчетов вероятности оголения винта по программе и по приближенным формулам (14), (15), (16), (17), (18).

$$\kappa_{P_0(L/B)1} = 0,1 + 0,121 \frac{L}{B}. \quad (14)$$

$$\kappa_{P_0(L/B)2} = \frac{1}{23(L/B) - 98}. \quad (15)$$

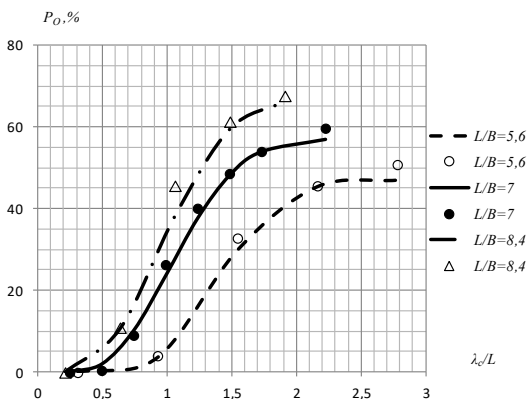


Рис.7. Вероятность оголения винта в зависимости от L/B . $Fr=0,14; \delta = 0,700; \alpha = 0,782; B/T=2,5$

$$\kappa_{P_0\alpha} = 3,55 - 3,23\alpha. \quad (16)$$

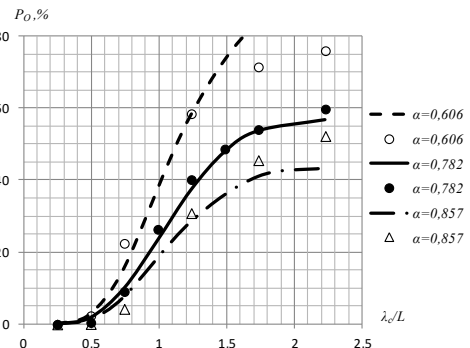


Рис.8. Вероятность оголения винта в зависимости от α . $Fr=0,14; \delta = 0,700; L/B=7,0; B/T=2,5$

$$\kappa_{P_0\delta} = 1,4\delta. \quad (17)$$

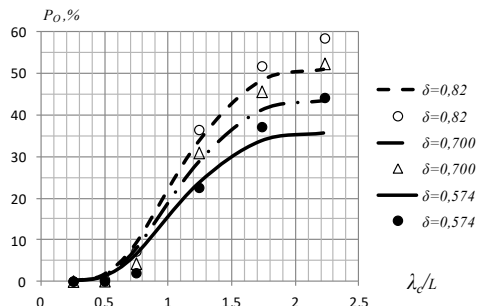


Рис.9. Вероятность оголения винта в зависимости от δ . $Fr=0,14; \alpha = 0,782; L/B=7,0; B/T=2,5$

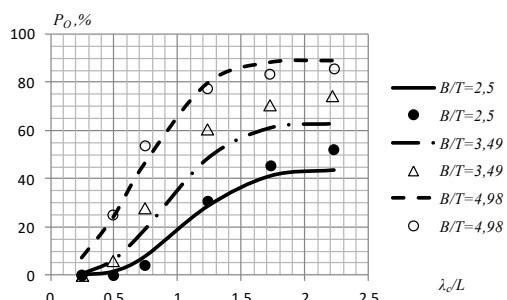


Рис.10. Вероятность оголения винта в зависимости от B/T . $Fr=0,14$; $\delta =0,700$; $\alpha =0,782$; $L/B=7,0$

$$K_{P_0(B/T)1} = 0,2(B/T) + 0,5 \quad (18)$$

$$K_{P_0(B/T)2} = 2,31 - 0,526(B/T) \quad (19)$$

Заключение

Выполненные систематические расчеты и их анализ позволили получить приближенные зависимости следующих показателей мореходности транспортных судов на нерегулярном волнении разной интенсивности:

- слеминга,
- оголения гребного винта судна.

Литература

1. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС с учетом корректировки кодекса ИМО по остойчивости в части ограничений продольной качки. Морские интеллектуальные технологии, №3 (45) Т. 2, 2019, с.65-69
2. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС в части ограничений продольной качки. Морские интеллектуальные технологии, №3 (49) Т. 1, 2020, с.15-20
3. Справочник по теории корабля (Под ред. Я.И. Войткунского). Т.2. Л.: Судостроение. 1985.
4. Бородай И.К., Невцетаев Ю.А. Мореходность судов. Л., "Судостроение", 1982.
5. Салькаев А.З. Определение гидродинамических характеристик бортовой и вертикальной качки. В сб.: Управляемость и мореходность судов. Труды НТО Судпрома, Л., Судостроение, 1969, вып. 126, с. 155-166.
6. Салькаев А.З. Расчет гидродинамических сил, действующих на регулярном волнении на суда с большим отношением ширины к осадке. Судостроение, 1980, № 4, с. 19-21.

References

1. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS s utschetom korrekcirovki kodeksa IMO po ostoytschivosti v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki. Morskije intellektualnye tekhnologii, №3 (45) Т. 2, 2019, s.65-69
2. Борисов Р.В., Лузянин А.А. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki. Morskije intellektualnye tekhnologii, №3 (49) Т. 1, 2020, s.15-20
3. Spravochnik po teorii korablya (Pod red. YA.I. Voitkunskogo). Т.2. L.: «Sudostroenie». 1985.
4. Borodai I.K., Necvetaev Y.A. Morehodnost sudov. L.: «Sudostroenie». 1982.
5. Salkaev A.Z. Opredelenie gidrodinamicheskikh harakteristik bortovoi i vertikalnoi kachki. V sb.: Upravlyaemost i morehodnost sudov. Trudu NTO Sudproma, L., «Sudostroenie». 1969, vup. 126, s.155-166.
6. Salkaev A.Z. Raschet gidrodinamicheskikh sil, deistvuistich na regularnom volnenii na suda s bolschim odnoscheniem schirini k osadke. Sudostroenie. 1980., № 4, s. 19-21.

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

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 6.04

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.034>

Влияние толщины профиля на грузоподъемность быстроходного судна с аэродинамической разгрузкой

Каунг Мьят Сое¹ e-mail: kaungmtu2017@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В последние несколько лет, высокоскоростные суда с аэродинамической разгрузкой вызывают интерес, как в гражданском, так и военно-морском транспорте. Было проведено много исследований аэродинамических профилей около границы раздела. Но исследований грузоподъемности крыла для этого типа судов было мало. В данной работе численно оценивалось влияние толщины профиля на грузоподъемность высокоскоростного судна с аэродинамической разгрузкой. Для изучения влияния толщины аэродинамического профиля в диапазоне от 10% до 60% хорды, были проведены расчеты на движущемся экране при углах атаки от 0° до 8° и ($h/c = 0,1$). Все аэродинамические профили имели хорду 1 м. Профили были модифицированы и имели плоскую нижнюю поверхность, чтобы избежать присасывания на малых углах атаки при малом отстоянии от границы раздела. Поскольку это является нежелательным явлением. Модель турбулентности k- ω SST использовалась для моделирования обтекания крыла при числах Рейнольдса ($R_e = 1 \times 10^6$). Для проверки результатов расчетов результаты CFD профиля NACA 4412 при движении над землей были сопоставлены с экспериментальными данными. В данной статье показано, какой тип толщины крылового профиля следует использовать для получения эффективной грузоподъемности высокоскоростного судна с аэродинамической разгрузкой при его проектировании.

Ключевые слова: высокоскоростные суда с аэродинамической разгрузкой, грузоподъемность крыла, толщина профиля, экранный эффект, вычислительная гидродинамика (CFD), численный эксперимент, модели турбулентности k- ω SST.

Effect of airfoil thickness on cargo carrying capacity for high speed ship with aerodynamic unloading

Kaung Myat Soe¹ e-mail: kaungmtu2017@gmail.com¹Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. In the past few years, high-speed aerodynamic unloading vessels have attracted interest in both civilian and naval transport. There have been many studies of airfoils near the interface. But there has been little research on wing loading for this type of vessel. In this study, the effect of the profile thickness on the carrying capacity of a high-speed vehicle with aerodynamic unloading was numerically estimated. To study the effect of the thickness of the airfoil in the range from 10% to 60% of the chord, calculations were carried out on a moving screen at angles of attack from 0° to 8° and ($h/c = 0.1$). All airfoils had a chord of 1 m. The airfoils were modified to have a flat bottom surface to avoid suction at low angles of attack with a small distance from the interface. As this is an undesirable phenomenon. The k- ω SST turbulence model was used to simulate the flow around the wing at Reynolds numbers ($R_e = 1 \times 10^6$). To check the calculation results, the CFD results of the NACA 4412 profile when moving above the ground were compared with the experimental data. This article shows what type of airfoil thickness should be used to obtain the effective carrying capacity of a high-speed aerodynamic craft in its design.

Keywords: high speed ship with aerodynamic unloading, Load carrying capacity of airfoil, airfoil thickness, ground effect, computational fluid dynamics (CFD), numerical experiment, turbulence models k- ω SST.

Введение

Быстроходные суда с аэродинамической разгрузкой – это новый тип транспортных судов, использующих аэродинамику для повышения энергоэффективности. Оснащая судно аэродинамическими несущими поверхностями можно добиться уменьшения эффективного водоизмещения. Транспортное средство находится в постоянном контакте с водой, поэтому аэродинамические поверхности испытывают влияние границы раздела сред, т.е. экранный эффект. Таким образом, изучение влияния экранного эффекта является важной задачей для такого типа транспортных средств. Многие эксперименты и численные расчеты были проведены различными исследователями для изучения характеристик аэродинамического профиля вблизи экрана. Например, распределение давления по симметричной поверхности профиля при различных отстояниях от экрана и углах атаки было изучено Ахмедом и Шармой [1]. Секция аэродинамического

профиля NACA4412 с закрылком в экстремальном экранном эффекте была численно исследована Окфеном и Матвеевым [2]. Однако влияние толщины профиля крыла вблизи земли его характеристики пока изучено недостаточно. Это исследование имеет важное значение для оценки эффективности аэродинамического профиля и его грузоподъемности при воздействии границы раздела.

Для изучения влияния толщины аэродинамического профиля были рассчитаны аэродинамические профили с различной толщиной (от 10% до 60% хорды), как показано на рисунке 1. Для толстых симметричных профилей под крылом образуется сужение при малых углах атаки на малых высотах, что вызывает присасывание крыла. Это является нежелательным эффектом. Желательно иметь более плоскую нижнюю поверхность, чтобы уменьшить этот эффект присасывания [3]. Поэтому в данном исследовании все секции профиля имели плоскую нижнюю поверхность. В данной работе численно исследовано влияние толщины крылового

профиля на грузоподъемность быстроходного судна с аэродинамической разгрузкой.

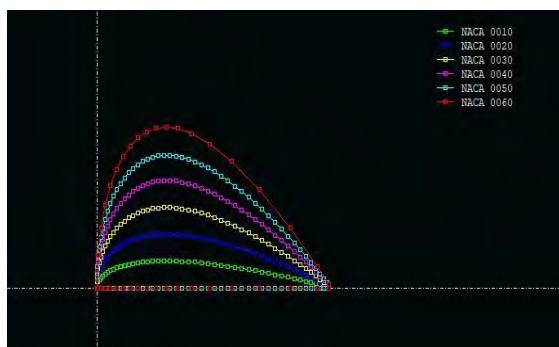


Рис. 1) шесть различных по толщине секций профиля (от 10% хорды до 60% хорды)

1. Методика расчета CFD

Численно исследованы аэродинамические характеристики профилей различной толщины вблизи стенки путем решения сжимаемых двумерных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса при использовании модели турбулентности k- ω SST методом конечных объемов. Модель SST k- ω является усовершенствованием оригинальной модели k- ω и устраняет некоторые специфические недостатки базовой модели, такие как чувствительность к уровням турбулентности свободного потока. Модель k- ω SST имеет то преимущество, что она может быть применена к области вязкого воздействия без дальнейшей модификации, что является одной из причин того, что она стала популярным выбором в аэрокосмических приложениях, где поток считается слишком сложным для Spalart -Allmaras [4].

1.1 Детали домена

Точки аэродинамического профиля были экспортированы в геометрию (Ansys Fluent) и создали геометрическую область. Затем геометрия профиля была экспортирована в сетку и использовалась неструктурированная сетка. Вместо традиционной C-сетки, которая обычно используется для геометрии профиля, для моделирования эффекта границы была выбрана прямоугольная область. Нижняя часть области, непосредственно под аэродинамическим профилем, моделируется на высоте h от задней кромки аэродинамического профиля до земли. Входное сечение расположено на расстоянии 12 C (C – хорда) от профиля, а выходное сечение удалено на 25 C. Дальняя граница поля на 12 C выше, чтобы избежать влияния границ, а нижняя граница области моделировала движущийся экран. На рисунке 2 показана вся область, а подробный вид представлен на рисунке 3.

Граничные условия имеют вид:

Набегающий поток: $u_x=15; u_y=0; u_z=0; \frac{dp}{dn}=0$.

Выход давления: $\frac{du}{dn} = 0, p=0$.

Дальняя граница поля: $\frac{du}{dn}=0, \frac{dp}{dn}=0$.

Подвижный экран: $u_x=15; u_y=0; u_z=0; \frac{dp}{dn}=0$.

Крыло: $u=0; \frac{dp}{dn}=0$.

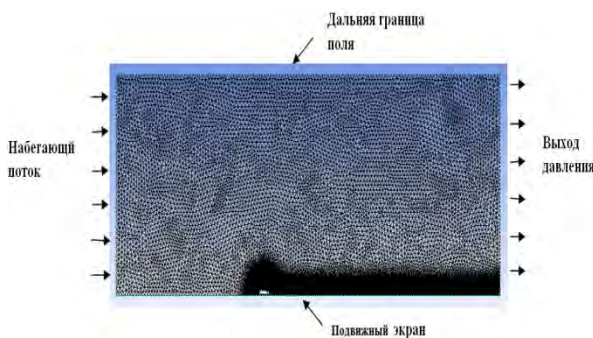


Рис.2. Геометрия модели (прямоугольной-Тип сетки) и граничные условия

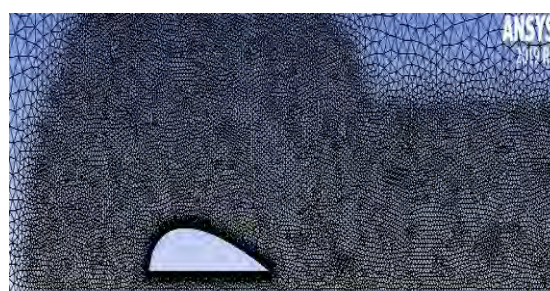


Рис. 3 близкий вид сетки вокруг геометрии профиля

1.2 Исследование независимости сетки

Исследование независимости сетки было создано для определения точности различных плотностей сетки. Преимущество грубой сетки заключается в более коротком времени выполнения, но существует риск ошибки в окончательном результате. Проверка исследования независимости сетки была выполнена на аэродинамическом профиле (10% толщина), $\alpha = 0^\circ$, $h/c = 0,1$ м с тремя вариантами сетки, отличающимися на 100 000 элементов. Результаты приведены в Таблице 1.

Таблица 1
Исследование влияния сетки для трех вариантов количества ячеек

Сетки	C_y	C_x
150,000	0.52	0.021
250,000	0,51	0.02
350,000	0.51	0.02

Очевидно, что значения C_y и C_x не сильно различаются для различных сеток. Число ячеек 250 000 было выбрано для правильного перехода от начального расстояния между ячейками, диктуемого выбранным значением $Y^+ = 1$. Значения Y^+ необходимы для правильного разрешения пограничного слоя любого объекта, движущегося в жидкости; значение 1 определяется для модели турбулентности k- ω SST.

2. Валидация вычислительного метода

Для подтверждения точности вычислительной методики рассчитаны аэродинамические характеристики NASA 4412 в условиях влияния земли. Коэффициенты подъемной силы и силы сопротивления сравниваются с экспериментальными данными [5]. Таблица 2 показывает, что достигается хорошее соответствие подъемной силы, в то время как сопротивление прогнозируется с ошибкой. Возможная причина - завышение вязкого сопротивления в зазоре между крылом и стенкой. С увеличением высоты эта погрешность уменьшается.

Таблице 2

Коэффициент подъемной силы и сопротивления NASA 4412 ($\alpha=8^\circ$)

Коэффициенты	EXP	CFD
C_y ($h/c = 0.4$)	1.2620	1.2150
C_x ($h/c = 0.4$)	0.0157	0.0210
C_y ($h/c = 1$)	1.2680	1.2010
C_x ($h/c = 1$)	0.0185	0.0220

3. Результаты расчетов и анализ

Для изучения влияния толщины профиля на грузоподъемность экранопланов было проведено численное исследование профиля, имеющего разную толщину (от 10% хорды до 60% хорды). Были проведены испытания над подвижным экраном под углом атаки от 0° до 8° и ($h/c = 0,1$). Полученные результаты показаны на рисунке (4), (5) и (6). На рисунке (7), (8) и (10) приведены полученные в процессе расчета поля скоростей и давления вокруг изучаемого профиля.

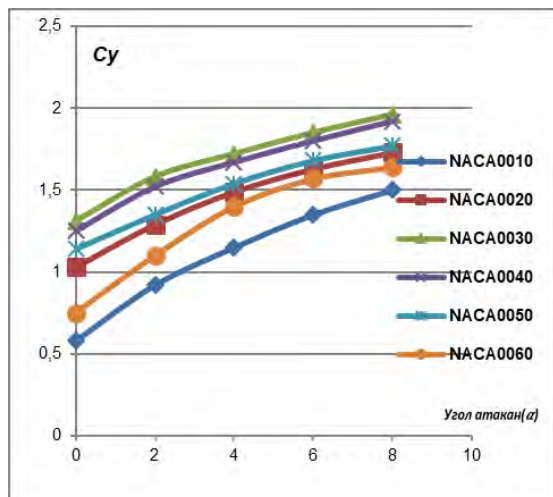


Рис. 4. Значения коэффициентов подъемной силы для профилей различной толщины при $h/c = 0,1$

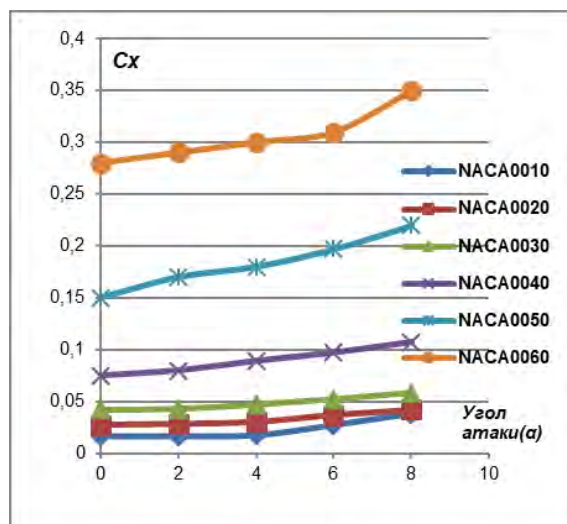


Рис 5. Коэффициенты силы сопротивления для профилей различной толщины при $h/c = 0,1$

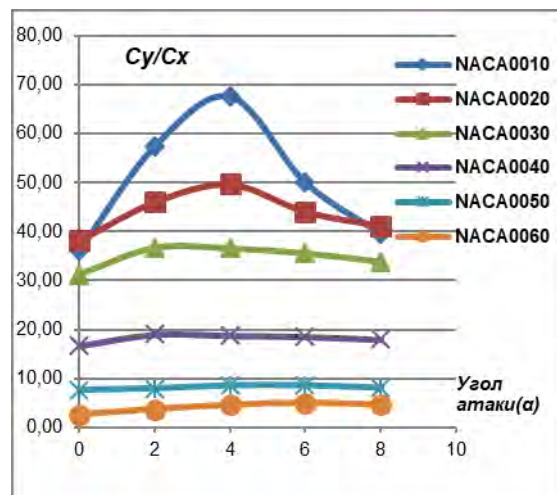
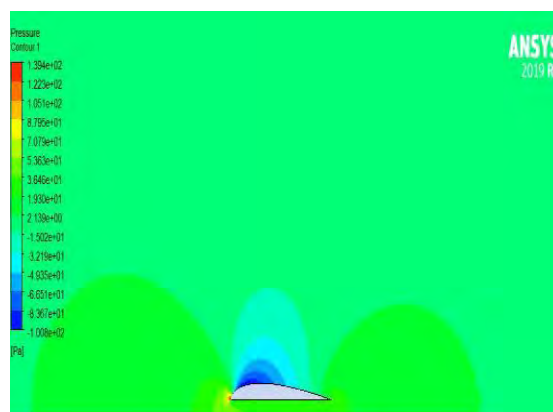
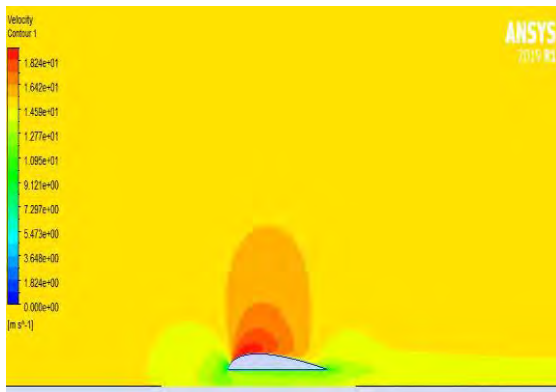


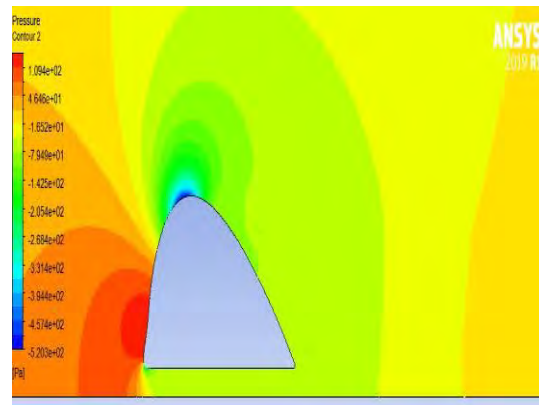
Рис 6. Отношение подъемной силы к сопротивлению для профилей различной толщины при $h/c = 0,1$



(A)

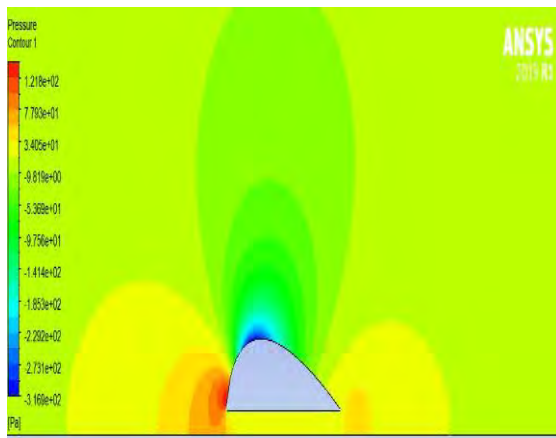


(Б)

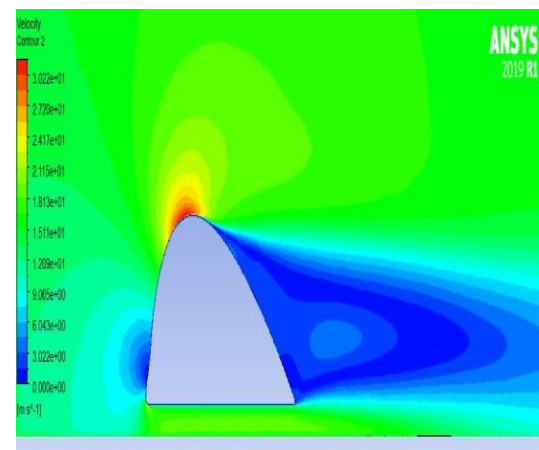


(Е)

Рис.7.(А) Распределение статического давления и (Б) распределение величины скорости вокруг 10% профиля при угле атаки 0 градусов и $h/c = 0,1$

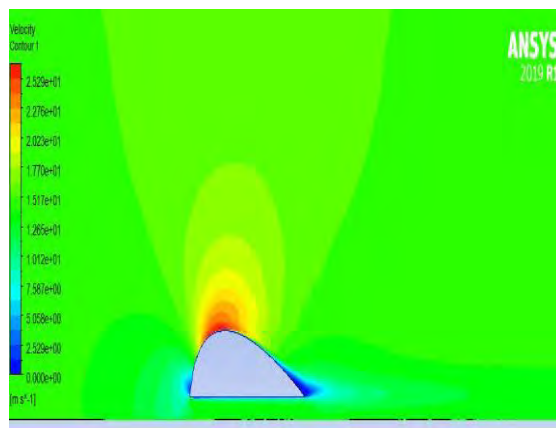


(е)



(Ё)

Рис.9. (Е) Распределение статического давления и (Ё) распределение величины скорости вокруг профиля толщиной 60% при угле атаки 0 градусов и $h/c = 0,1$



(з)

Рис.8. (Б) Распределение статического давления и (Г) распределение величины скорости вокруг 30% профиля при угле атаки 0 градусов и $h/c = 0,1$

Закключение

Согласно полученным результатам, подъемная сила постепенно увеличивается с увеличением толщины профиля (от 10% до 30% хорды). Было обнаружено, что аэродинамический профиль толщиной 30% около границы раздела создает наибольшую подъемную силу. За пределами этой толщины подъемная сила постепенно уменьшается с увеличением толщины профиля. Силы сопротивления увеличиваются с увеличением толщины профиля для всех толщин. Согласно результатам соотношения подъемной силы к сопротивлению, аэродинамический профиль толщиной 10% и 20% имеет высокое аэродинамическое качество.

Таким образом, тонкие аэродинамические профили (10% и 20%) могут использоваться для судна с аэродинамической разгрузкой, чтобы получить высокую подъемную силу при малом сопротивлении. Для получения максимального эффекта увеличения подъемной силы вблизи границы раздела на подобных судах следует использовать профиль толщиной 30%.

Литература

1. Ahmed MR, Sharma SD. "An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect" *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005;29(6):633–647.
2. Ockfen AE, Matveev KI. "Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect" *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009;1(1):1–12.
3. Ahmed M. Rafiuddin. "Flow over thick airfoils in ground effect – an investigation on the influence of camber" (24th international congress of the aeronautical sciences) (2004).
4. Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation Shawn Wasserman posted on November 22, 2016 (<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>).
5. Ahmed M. R, Takasaki. T, Kohama. Y. "Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect "[J] AIAA, 2007.

References

1. Ahmed MR, Sharma SD. "An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect" *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005;29(6):633–647.
2. Ockfen AE, Matveev KI. "Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect". *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009;1(1):1–12.
3. Ahmed M. Rafiuddin. "Flow over thick airfoils in ground effect – an investigation on the influence of camber" (24th international congress of the aeronautical sciences) (2004).
4. Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation Shawn Wasserman posted on November 22, 2016 (<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>).
5. Ahmed M. R, Takasaki. T, Kohama. Y. "Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect "[J] AIAA, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каунг Мьят Сое, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kaungsmtu2017@gmail.com

Kaung Myat Soe, graduate student, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kaungsmtu2017@gmail.com.com

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 632.151: 629.5.017.2/.015.24

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.035>

К оценке индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) судна с энергосберегающими крыльевыми устройствами

К. В. Рождественский¹ e-mail: kvrxmas@yahoo.com, Зин Мин Хтет¹ e-mail: zinmin.353828@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье приводится оценка индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) для судна с энергосберегающими крыльевыми устройствами на встречном регулярном волнении. Вначале на основе предыдущих работ авторов с применением линейной теории поперечных сечений определяются характеристики продольной (вертикальной и килевой) качки судна без крыльев, и такого же судна с крыльями большого удлинения, установленными на днище вблизи оконечностей с целью преобразования волновой энергии в дополнительную тягу. После определения параметров качки судна с крыльями как твердого тела, с применением теории Теодорсена колеблющегося профиля определяется средняя по периоду тяга энергосберегающих крыльевых элементов, совершающих поступательно-вращательные колебания. С другой стороны, в статье находится общее сопротивление системы «судно-крыльевые элементы». При этом применяется метод Холтропа в сочетании с теорией Бейкельмана-Герритсммы. Последняя дает возможность произвести оценку дополнительного волнового сопротивления по найденным параметрам продольной качки судна с крыльями и без крыльев. Затем оценивается значение индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) контейнеровоза, снабженного энергосберегающими крыльями на встречном волнении. Исследование показывает, что установка на днище крыльевых элементов может использоваться как один из способов сокращения выброса углекислого газа и уменьшения в соответствии с требованиями Международной морской организации ИМО, значения индекса EEDI для репрезентативных морских условий.

Ключевые слова: продольная (вертикальная и килевая) качка судна, сила тяги, дополнительное сопротивление, движители типа «машущее крыло», теория Герритсммы и Бейкельмана, индекс проектной энергетической эффективности (EEDI) ИМО.

To estimation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for a ship with energy-saving wing devices

Kirill V. Rozhdestvensky¹ e-mail: kvrxmas@yahoo.com, Zin Min Htet¹ e-mail: zinmin.353828@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. In this paper an estimation is presented of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for a ship with energy-saving wing devices in headwind regular waves. At first, based on previous works of the authors, there are determined with use of linear strip theory the characteristics of longitudinal (heaving and pitching) motions of a ship without wings and identical ship equipped with wings of large aspect ratio fitted on the bottom near extremities for the purpose of converting wave energy into additional thrust. After motions of the ship with wings as a solid body are determined Theodorsen theory of oscillating foil is applied to calculate period averaged thrust of energy-saving wing elements, performing combined heave-pitch oscillations. On the other hand, the paper addresses the problem of determining overall drag of the "wing-plus-wings" system with use of Holtrop method combined with Beikelmann-Gerritsma theory. The latter enables carrying out an estimation of additional wave resistance based on the calculated parameters of the ship longitudinal motions with and without wings. Then follows an estimation of the EEDI for a containership equipped with wings in headwind regular waves. The study shows that fitting wing elements on the ship bottom can be seen as one of the methods for decreasing the magnitude of the EEDI for representative sea conditions as per requirements of the International Maritime Organization.

Key words: heave and pitch ship motion, thrust force, added resistance, "flapping-wing" propulsors, Beukelman-Gerritsma theory, energy efficiency design index (EEDI), IMO.

Введение

В начале 21-го века около 90% мировой торговли осуществляется международным судоходством и составляет существенную часть современной мировой экономики. Для реализации технологий *зеленого* судна предлагаются процедуры по уменьшению объема вредных выбросов, снижению потребления энергии и повышению эффективности. Принято определять *зеленое* или *экологическое* судно, означает судно, на котором удалось сократить выбросы парниковых газов за счет разработки технологий, связанных с экономией топлива и применением их альтернативных видов. Сегодня трудно представить, что 200 лет назад океанские суда обеспечивали транспортировку товаров по всему миру, используя возобновляемую энергию ветра и волн. Например, парусник Катти

Сарк – вершина проектирования клипперов и одно из самых быстроходных судов своего времени, достигал скорости в 17 узлов, не использовал ни капли нефти и имел нулевой уровень вредных выбросов в морскую среду [1]. Балкер XXI века, движущийся со скоростью 12-16 узлов сжигает многие тонны углеводородного топлива и выбрасывает в атмосферу и морскую биосферу недопустимые объемы парниковых газов.

Возможно, самая насущная проблема выживания человечества связана с наблюдаемым резким изменением климата из-за критического антропогенного воздействия на атмосферу и морскую биосферу.

Судоходство является жизненно важным сектором мировой экономики, обеспечивая транспортировку более 80% мирового объема

торговли. Однако, оно же вносит наибольший вклад в загрязнение окружающей среды, составляющий по данным Международной морской организации¹ порядка 800 мегатонн CO_2 в год. Критическая необходимость снижения вредных выбросов в атмосферу обусловила жесткие экологические требования Международной морской организации по проектированию новых судов с учетом рекомендованных значений проектного индекса энергетической эффективности EEDI (Energy Efficiency Design Index). Контроль значений этих индексов для строящихся судов и существующих судов предусмотрен регулирующими документами ведущих морских классификационных обществ. В то же время, например по оценкам экспертов системы мониторинга, информирования и проверки Европейского союза (EU MRV), существующий коммерческий флот, уже сегодня имеет подтвержденные объемы выброса «парниковых газов», которые могут привести к превышению установленного Парижским соглашением 2015 года по климату максимального порогового значения приращения глобальной температуры в $15^\circ C$ по отношению к доиндустриальному уровню. Таким образом, кроме необходимости проектирования судов с минимальной эмиссией CO_2 , требуется уменьшать выбросы судов существующего флота посредством снижения эксплуатационной скорости хода, перехода на наиболее экологичные виды топлива и повышения эффективности путем технической модернизации.

Важнейшим направлением снижения антропогенного влияния судов на окружающую среду является полный или частичный переход на использование возобновляемой (солнечной, ветровой и волновой) энергии океана.

Возможный путь решения вышеизложенных задач состоит в использовании судов с энергосберегающими крыльями, как вновь создаваемых, так и за счет модернизации существующих путем установки энергосберегающих крыльевых устройств. На этом направлении уже сделаны определенные шаги.

На сегодняшнее время норвежская компания «Wavefoil» провела полномасштабные испытания с выдвижным носовым крылом на пассажирском пароме M/F TEISTIN, показавшим среднюю экономию топлива порядка 10%. В процессе модернизации модуль крыла был установлен в сборную стальную конструкцию, одобренную DNV GL, см. Рис. 1 [2]. Модуль крепится посредством двух массивных балок прямоугольного сечения с применением амортизирующих прокладок из синтетического каучука.

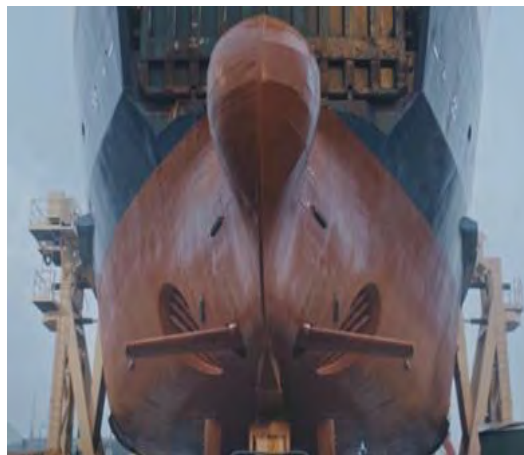


Рис. 1. Установка судовой конструкции с полномасштабной выдвижным носовым крылом на пароме M / F Teistin [2]

В начале 2020, технологическая группа «Wärtsilä» в составе консорциума из шести других отраслевых и академических партнеров получила финансирование от EU на крупный проект «SeaTech», направленный на сокращение потребления топлива и снижение уровня выбросов при судоходстве.

Консорциум «SeaTech»-project был создан для разработки двух симбиотических инноваций в области судовых двигателей и двигательных установок, которые в сочетании с применением носового энергосберегающего крыла могут привести к 30-процентному сокращению расхода топлива. При этом проект предусматривает сокращение выбросов оксидов серы (SO_x) и азота (NO_x) на 99 процентов, сокращение выбросов CO_2 на 46 процентов и сокращение выбросов твердых частиц на 94 процента.

Предлагаемая концепция предусматривает точное управление двигателем для достижения радикального снижения уровня выхлопных газов. Инновационная двигательная установка на основе возобновляемых источников энергии представляет собой динамическое крыло, установленное на носу судна для усиления тяги в умеренных и тяжелых морских условиях за счет энергии волн при

¹ Third IMO GHG study, 2014

одновременном создается с одновременным умерении качки, см. Рис. 2, [3].

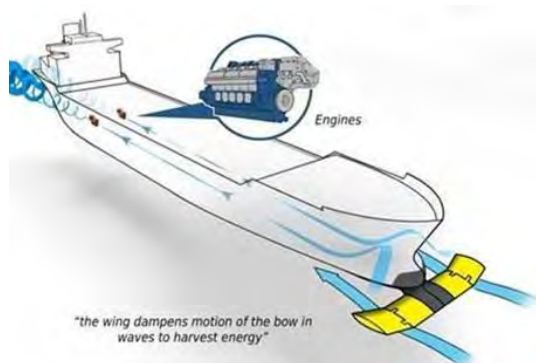


Рис. 2. Проект EU-2020, использующий носовое крыло в сочетании с инновационной системой управления судовых двигателям [3]

В настоящей статье с применением результатов работ авторов по математическому моделированию судов с энергосберегающими крыльями производится оценка индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) для таких судов при движении на встречном регулярном волнении. Базовая формулировка EEDI включает оценку общего объема выбросов CO₂, приходящегося на на тонно-милю. Объем выбросов CO₂ зависит от расхода топлива, снижение которого на прямую связано с применением энергосберегающих технологий. В случае энергосберегающего судна с крыльевыми устройствами можно направленно влиять на его продольную качку с целью уменьшения амплитуд качки и дополнительного сопротивления на волнении. Полученные расчетные данные для судна на встречном регулярном волнении демонстрируют возможность снижения EEDI судна, использующего крылья для трансформации волновой энергии в дополнительную тягу, что позволяет рассматривать такую технологию как альтернативный способ сокращения выбросов CO₂.

1. Анализ возможности уменьшения амплитуд качки и дополнительного сопротивления для судна с крыльевыми устройствами на волнении

Связанные уравнения продольной качки судна на регулярном волнении могут быть записаны в следующей форме [4,5]

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega_0 t}, \tag{1}$$

$$A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F_5 e^{i\omega_0 t}, \tag{2}$$

где A_{ik} - коэффициенты присоединенных масс, B_{ik} - коэффициенты сопротивления; C_{ik} - коэффициенты восстанавливающих сил; i - индекс вида качки, для которого подсчитывается сила сопротивления, или мнимая единица; k - вид поступательного или

вращательного движения, η_3 - вертикальная качка, η_5 - килевая качка.

Как отмечалось в предшествующих статьях и докладах авторов [5,8,9], амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) вертикальной и килевой качки, полученная численным моделированием, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и с методом 3D-панелей. В данной работе расчетные оценки выполнены для контейнеровоза S-175 с характерными параметрами $L = 175\text{ м}$, $B = 25,4\text{ м}$, $T = 9,5\text{ м}$ для числа Фруда $F_n = 0,275$ и «курсового» угла $\beta = 180^\circ$, см. на Рис. 3 и 4.

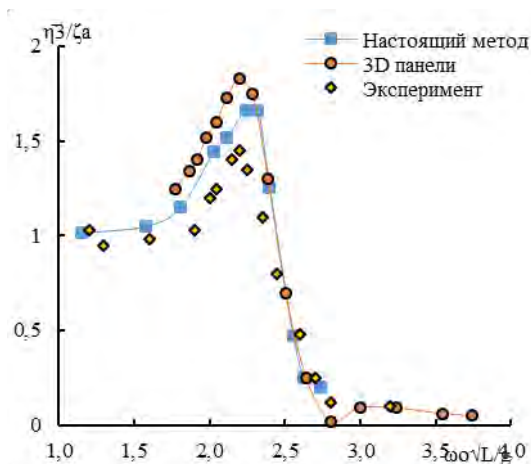


Рис. 3. АЧХ вертикальной качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле $\beta = 180^\circ$

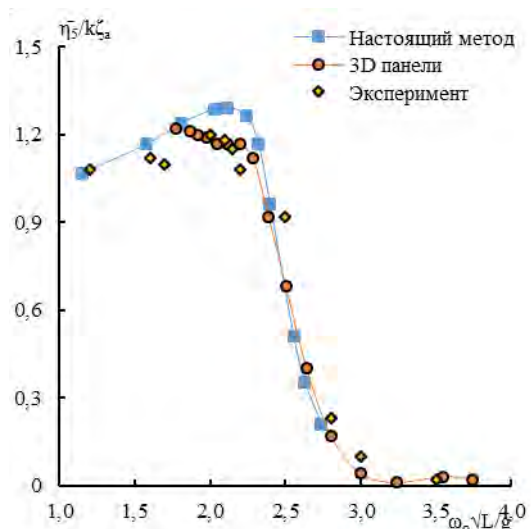


Рис. 4.. АЧХ килевой качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле $\beta = 180^\circ$

В представленных на Рис. 3 и 4 графиках приняты следующие обозначения: $\bar{\eta}_3/\zeta_a$ - безразмерная амплитуда вертикальной качки, $\bar{\eta}_5/k\zeta_a$ - безразмерная амплитуда килевой качки.

В частности, применяются формулы расчета производных подъемной силы и момента крыльев бесконечного удлинения, приведенные в статьях и докладах авторов [6-11]. Перечет на конечное удлинение в данной работе осуществлялся по формулам теории несущей линии Прандтля. В итоге уравнения (1,2) приводятся к системе дифференциальных уравнений, описывающих динамическую систему "крылья-качающееся судно", Рис. 5

$$(M + A_{33} + A_{33,foil})\ddot{\eta}_3 + (B_{33} + B_{33,foil})\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + (A_{35} + A_{35,foil})\ddot{\eta}_5 + (B_{35} + B_{35,foil})\dot{\eta}_5 + (C_{35} + C_{35,foil})\eta_5 = F_3 e^{i\omega_e t} + F_{3W,foil}, \quad (3)$$

$$(I_5 + A_{55} + A_{55,foil})\ddot{\eta}_5 + (B_{55} + B_{55,foil})\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + (A_{53} + A_{53,foil})\ddot{\eta}_3 + (B_{53} + B_{53,foil})\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega_e t} + F_{5W,foil}, \quad (4)$$

где $A_{ik,foil}$, $B_{ik,foil}$, $C_{ik,foil}$, $F_{iW,foil}$ – соответственно добавки в коэффициенты присоединенных масс, демпфирования, восстанавливающих и возмущающих сил, ассоциированные с влиянием крыльев. Указанные параметры приведены в статьях авторов [6-11].



Рис. 5. Контейнеровоз с энергосберегающими крыльевыми устройствами

Характерные параметры крыльев приведены в таблице 1.

Таблица 1
Характерные параметры крыльев

	Крыло № 1	Крыло № 2	Крыло № 3
Типа крыла	NACA 0012		
Хорд (с)м	5	5	5
Размах (с)м	15	20	25
удлинение крыла (Λ)	3	4	5

1.1. Снижение осредненных по частотам амплитуд продольной качки

Некоторые сравнительные расчетные данные авторов [5,7-11] для случая продольной качки судна с энергосберегающими крыльевыми элементами на регулярном встречном волнении показаны на следующих рисунках²

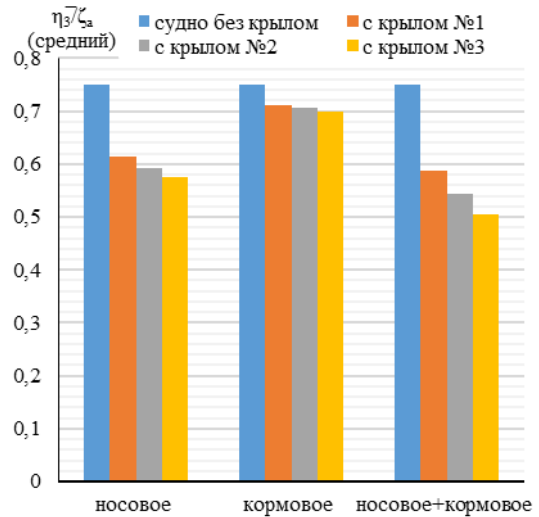


Рис. 6. Осредненные амплитуды верт. качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,204$)

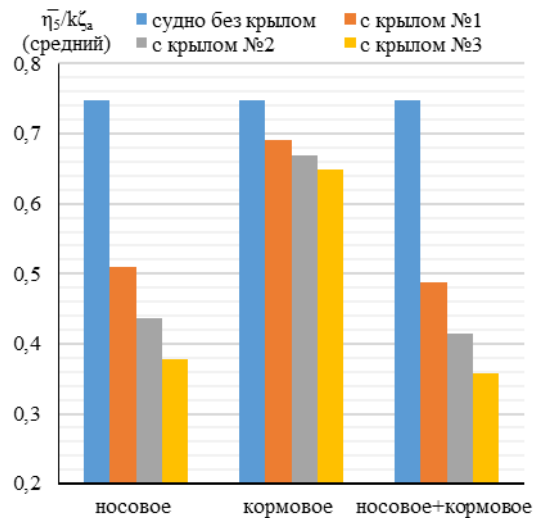


Рис. 7. Осредненные амплитуды килевой качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,204$)

² Осреднение амплитуд произведено по всем расчетным точкам частотного диапазона

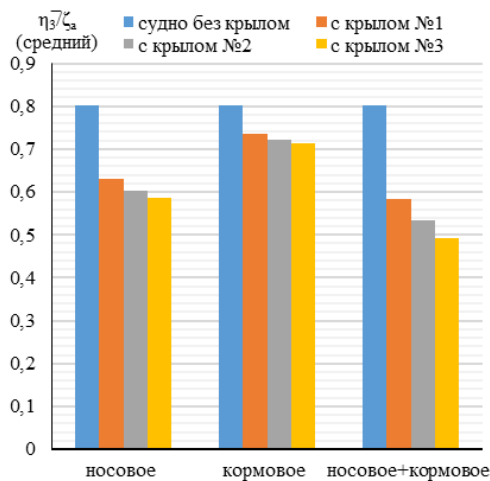


Рис. 8. Осредненные амплитуды верт. качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,24$)

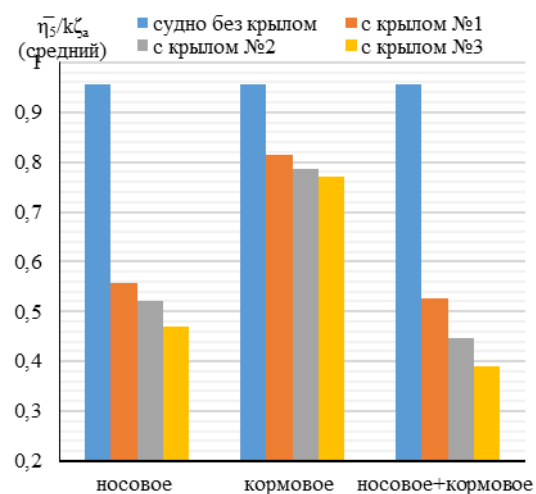


Рис. 11. Осредненные амплитуды килевой качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,275$)

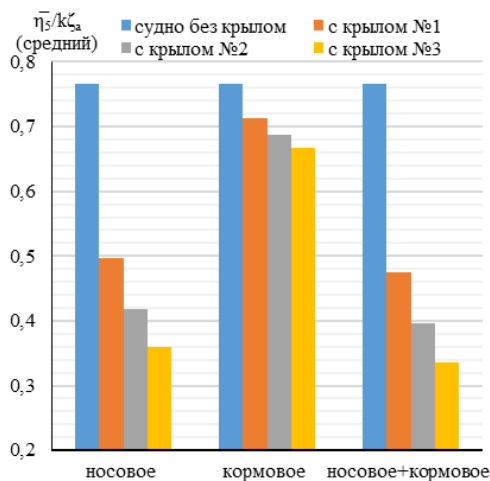


Рис. 9. Осредненные амплитуды килевой качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,24$)

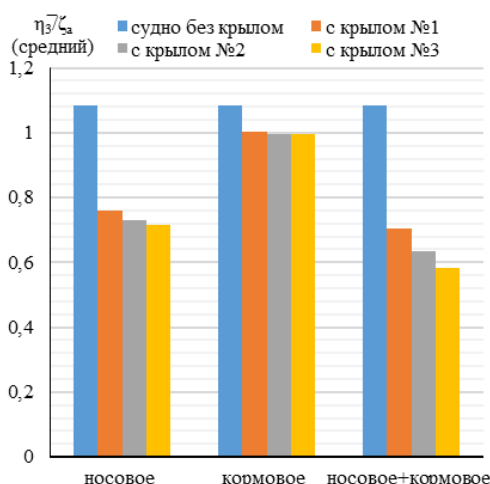


Рис. 10. Осредненные амплитуды верт. качки контейнеровоза S-175 с крыльями ($F_n = 0,275$)

Анализируя рисунки 6 – 11 можно заключить, что осредненные амплитуды продольной качки на встречном волнении являются *наименьшими* при совместном использовании носового и кормового крыльев и *достаточно малы* при использовании только носового крыла. При построении графиков 6-11 использованы результаты по АЧХ, полученные в предыдущих работах авторов [5,7-11].

1.2. Снижение дополнительного сопротивления

Важным фактором эффективности энергосберегающих крыльев является сопутствующее снижение дополнительного сопротивления. Практический метод расчета дополнительного сопротивления предложен Герритсмой и Бекельманом. Метод основан на определении энергии волн, создаваемых судном при продольной качке. В соответствии с гипотезой плоских сечений, энергия, излучаемая качающимся судном за счет волнообразования в течении периода качки, $T = 2\pi/\omega_e$, равна:

$$E = \int_0^T \int_0^L b' U_z dx dt \quad (5)$$

где $b' = b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_f}$, коэффициент демпфирования,

b_{33} и a_{33} - соответственно коэффициенты присоединенных масс и демпфирования при нулевой скорости, U – скорость судна в узлах.

$$U_z = -U\dot{\eta}_3 - \dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_3 + i \left[\omega \zeta_a e^{kz} e^{i(\omega_e t - kx_f \cos(\beta))} \right] \quad (6)$$

где $Z = A'/B$, A' – площадь смоченной поверхности судна, B – ширина судна.

Излучаемая в течение одного периода колебаний энергия также может быть выражена через

дополнительное сопротивление. Тогда, уравнение (5) принимает вид

$$E = R_{aw} \lambda_\beta = R_{aw} \left(\frac{\lambda}{\cos(\beta)} \right) = R_{aw} \left(\frac{2\pi}{-k \cos(\beta)} \right) \quad (7)$$

где λ_β – расстояние, преодолеваемое судном при его движении под углом к фронту волны

Для безразмерного дополнительного сопротивления, учитывающего продольную качку, можно получить

$$R_{aw} = \frac{R_{Aw}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2 / L)} = \frac{-k \cos(\beta)}{2\pi} \int_0^T \int_0^L b' U_z^2 dx_f dt \quad (8)$$

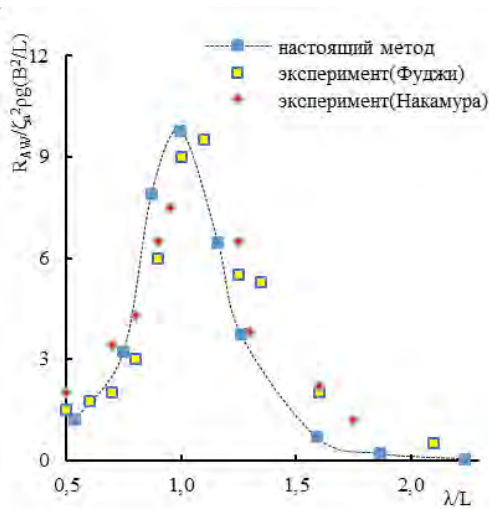


Рис. 12. Безразмерное дополнительное сопротивление контейнеровоза при числе Фруда $F_n = 0,2$

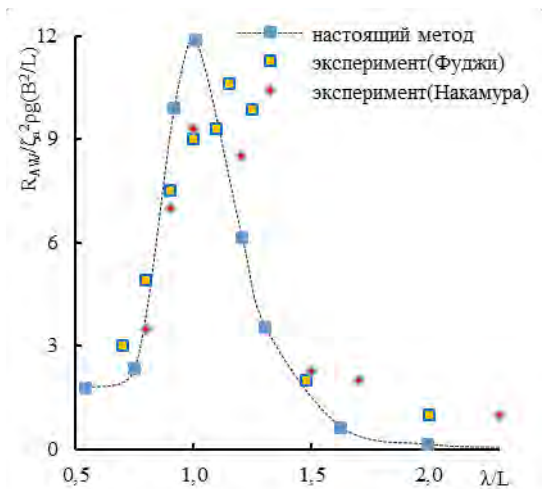


Рис. 13. Безразмерное дополнительное сопротивление контейнеровоза при числе Фруда $F_n = 0,24$

Расчеты дополнительного сопротивления судна проведены при числах Фруда $F_n = 0,2$ и $F_n = 0,24$, «курсовом» угле $\beta = 180^\circ$. Полученные для данного судна по дополнительному сопротивлению результаты, можно найти в статьях и докладах авторов [10,11,13].

Данные по дополнительному сопротивлению, приведенные на Рис. 14 и 15 получены путем осреднения по всем расчетным точкам диапазона длин волн.

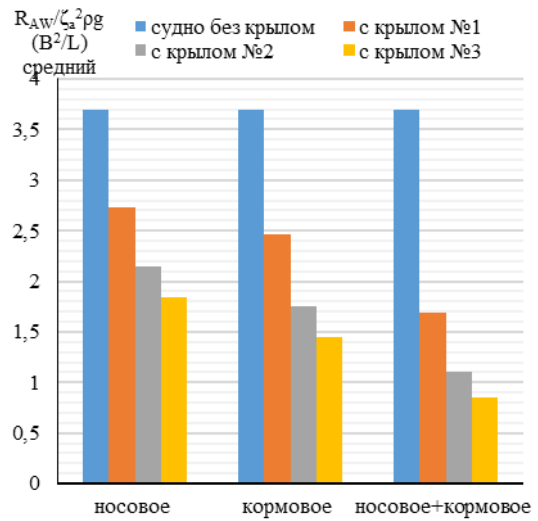


Рис. 14. Осредненное по длинам волн безразмерное дополнительное сопротивление S-175 с крыльями при числе Фруда $F_n = 0,2$

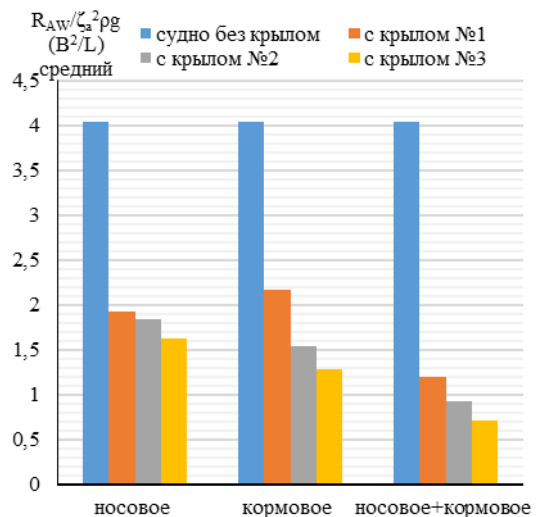


Рис. 15. Осредненное по длинам волн безразмерное дополнительное сопротивление S-175 с крыльями при числе Фруда $F_n = 0,24$

Анализируя Рис. 14 и 15, можно заключить, что безразмерное дополнительное сопротивление судна при совместном использовании носового и кормового является наименьшим. Полученные для данного судна результаты по безразмерному дополнительному сопротивлению, можно найти в статьях и докладах авторов [10,11,13].

2. Определение сопротивления судна на тихой воде и силы тяги за счет крыльевых устройств на волнении.

Для расчета полного сопротивления используется метод Холтропа [14]

$$R_{total,ship} = R_f(1+k) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (9)$$

где R_f – сопротивление трения; R_{AP} – сопротивление выступающих частей; R_W – волновое сопротивление, R_B – дополнительное сопротивление давлению бульбовидного носа, R_{TR} – дополнительное сопротивление давлению погруженной транцевой кормы; R_A – остаточное сопротивление судна пересчитанное с модели, k – коэффициент учета влияния формы.

Для изучения сопротивления судна был выбран следующий диапазон чисел Фруда: $F_n = 0 - 0,275$.

Отметим, что при проведении расчета составляющие сопротивления R_{AP} , R_{TR} не учитывались. При этом уравнение (9) имеет вид

$$R_{total,ship} = R_f(1+k) + R_W + R_B + R_A \quad (10)$$

На Рис.16 показан график сопротивления судна на тихой воде, полученный посредством формулы (10)

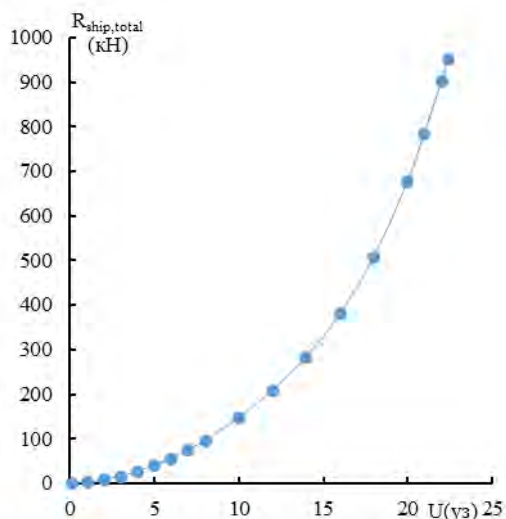


Рис. 16. Сопротивление судна S-175 на тихой воде

Для определения средней за период силы тяги нужно умножить осредненный коэффициент тяги на скоростной напор и площадь крыла (крыльев), т.е

$$\langle R_t \rangle = \langle C_t \rangle \frac{\rho U^2}{2} S_{wing} \quad (11)$$

Формулы для среднего по периоду коэффициента силы тяги крыла (крыльев), для случая продольной качки судна с крыльями можно найти в статьях и докладах авторов [8,9,12,13]. Полученные результаты расчета силы тяги для данного судна с крыльевыми устройствами, приведены в докладе авторов [9].

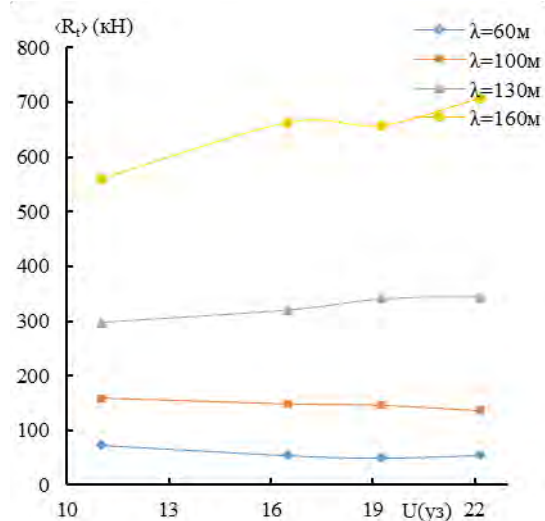


Рис. 17. К вычислению скорости и тяги судна, крыло №1 в носовой части судна

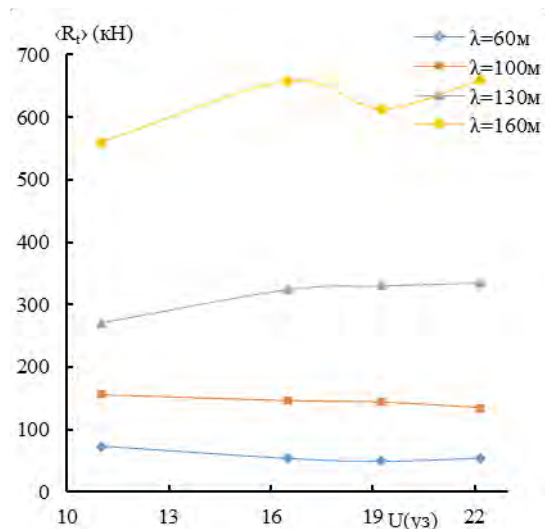


Рис. 18. К вычислению скорости и тяги судна, крыло №1 в кормовой части судна

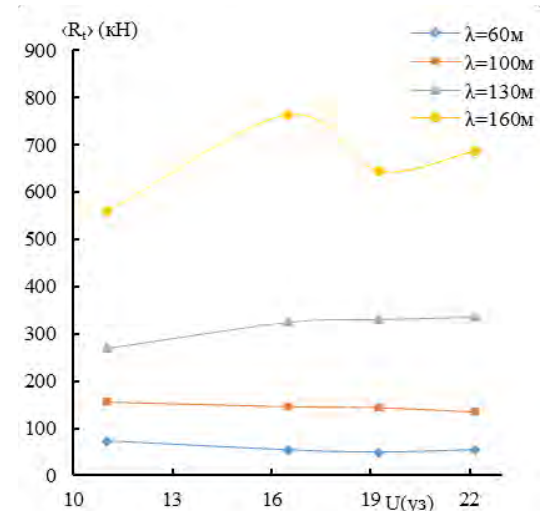


Рис. 19. К вычислению скорости и тяги судна, крыло №1 в носовой и кормовой частях судна

На Рис. 17-19 приведены результаты расчета силы тяги на крыльях контейнеровоза S-175. Анализируя рисунки 17 – 19 можно заключить, что сила тяги при совместном использовании носового и кормового крыльев является наибольшей. Другие результаты по силе тяги данного судна можно найти в докладе авторов [9].

3. Определение индекса проектной энергетической эффективности (EEDI) судна с крыльевыми устройствами

Международная морская организация (ИМО) дала четкое определение индекса проектной энергетической эффективности (EEDI), который можно рассматривать как меру экологичности судна. По сути EEDI введен как вес углекислого газа (в граммах), выбрасываемого судном на тонно-милю.

EEDI (г. CO₂/т-миля) можно определить по следующей формуле:

$$EEDI = \frac{N_e \cdot B_e \cdot C_{Fuel}}{DWT \cdot U} \quad (12)$$

где N_e – мощность главного двигателя на эксплуатационном режиме, кВт; B_e – удельный эффективный расход топлива ГЭУ, г/кВт.ч, по данным [18] для двигателя данного судна (дизель) $B_e = 167$ г/кВт.ч]; DWT – дедвейт судна, т ; U – скорость судна на эксплуатационном режиме, узлы; C_{Fuel} – безразмерный коэффициент, зависящий от типа топлива, применяемого в ГЭУ, определяемый по содержанию углерода в топливе, в соответствии с эталоном IMO (2018)[16]. Для тяжелого дизельного топлива $C_{Fuel} = 3,114$ [г CO₂ / т топлива]. (Выбрали главный двигатель для данного судна MAN B & W(G60ME-C9))

Требуемая мощность для приведения судна в движение главным двигателем может быть оценена по формуле, введенной в Даниловского [17]

$$N_e = \left(\frac{R_D \cdot 0.514U}{\eta_{вал} \cdot \eta_{неп} \cdot \eta_{пр}} + N_{нав} - N_{ум} \right) / Z_E \quad (13)$$

где N_e – мощность на выходе двигателя, R_D – общее сопротивление на тихой воде, U – скорость судна (уз), $\eta_{вал}$ – КПД валопровода, $\eta_{неп}$ – КПД передача, $\eta_{пр}$ – пропульсивный коэффициент, k_z – коэффициент запаса мощности, $N_{нав}$ – мощность навешенных механизмов не учитываемых механическим КПД двигателя, кВт, $N_{ум}$ – мощность утилизационных турбин, работающих на винте, кВт, Z_E – число движителей.

Пренебрегая $N_{нав}$, $N_{ум}$, и полагая $Z_E = 1$, запишем уравнение (13) в виде

$$N_e = \frac{R_D \cdot 0.514U}{\eta_{вал} \cdot \eta_{неп} \cdot \eta_{пр}} \quad (14)$$

где $\eta_{вал} = 0,98$; $\eta_{неп} = 1$; $\eta_{пр} = 0,65$.

Для учета силы ветра и волн ИМО вводит специальный индекс $EEDI_{weather}$. Это индекс проектной энергетической эффективности при встречном ветре в 6 баллов по шкале Бофорта (высота волн 3–4 м), [15,16]. Когда судно эксплуатируется в таких (репрезентативных) морских условиях, его сопротивление оказывается выше, чем на тихой воде. По рекомендации ИМО, индекс $EEDI_{weather}$ рассчитывается следующим образом:

$$EEDI_{weather} = \frac{N_{e(wave)} \cdot B_e \cdot C_{Fuel}}{DWT \cdot U} \quad (15)$$

где $N_e = \frac{R_{D(wave)} \cdot 0.514U}{\eta_{вал} \cdot \eta_{неп} \cdot \eta_{пр}}$ – мощность на выходе

двигателя, которая зависит от общего сопротивления в репрезентативных морских условиях (баллы Бофорта 6).

По рекомендации ИМО[19], сопротивление $EEDI_{weather}$ рассчитывается следующим образом:

$$R_{D(wave)} = R_{ship,t} + R_{AW,wind} + R_{AW} \quad (16)$$

где $R_{ship,t}$ – сопротивление судна на тихой воде, $R_{AW,wind}$ – дополнительное сопротивление ветра, R_{AW} – дополнительное сопротивление, см. (8).

Для сравнительной оценки $EEDI_{weather}$ для судна без крыльев и с ними нужно рассчитать соответствующую потребную мощность величина которой определяется общим сопротивлением. Последнее вычисляется по формуле (17) для судна без крыльев и по формуле (18) для судна с крыльями.

$$R_{D(wave)}[nofoil] = R_{ship,t} + R_{AW(ship)} \quad (17)$$

$$R_{D(wave)}[withfoil] = R_{ship,t} + R_{AW(ship+foil)} + R_{foil,viscous} - \langle R_t \rangle \quad (18)$$

В этих формулах принято: $R_{foil,viscous}$ – вязкостное сопротивление крыла, $R_{AW(ship)}$ – дополнительное сопротивление судна по уравнения(8), $R_{AW(ship+foil)}$ – дополнительное сопротивление судна с крылом(или с крыльями)

На Рис.20 показан график $EEDI_{weather}$ судна с крыльями и без них, где указанный индекс выражается в граммах (CO₂) на тонну-милю(g CO₂.t nm). Здесь расчет $EEDI_{weather}$ произведен при встречном ветре в 6 баллов по шкале Бофорта и высоте волн 3 м. Анализируя Рис. 20 можно заключить, что $EEDI_{weather}$ судна при совместном использовании носового и кормового крыльев является *наименьшим*. При использовании кормового крыла ситуация *наихудшая*, а для судна с носовым крылом $EEDI_{weather}$ принимает *промежуточные значения*.

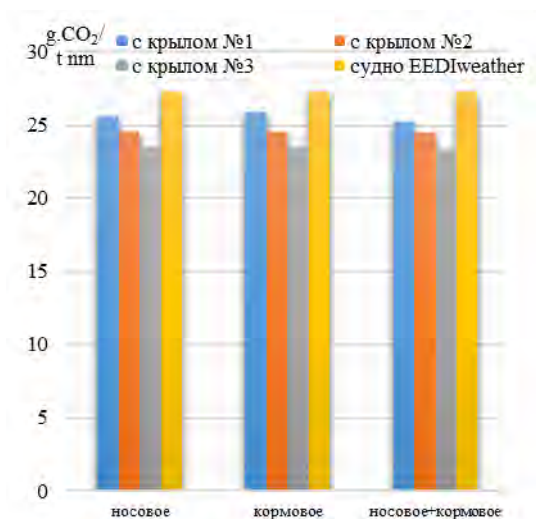


Рис. 20. Результаты индексы EEDI_{weather} судна с крыльевыми устройствами (U=22 уз)

Более подробно получение результатов EEDI и EEDI_{weather} для данного судна с крыльевыми устройствами изложено в работах авторов [12,13].

Выводы

Проведенное исследование индекса проектной энергетической эффективности EEDI_{weather} контейнеровоза S-175 с крыльевыми элементами на встречном регулярном волнении показало, что:

1. Имеет место умерение продольной качки
 - 1.1. при использовании только носового крыла: от 30% до 50% при $F_n = 0,275$, от 22% до 54% при $F_n = 0,24$ и от 19% до 50% при $F_n = 0,2$.

- 1.2. при использовании только кормового крыла: от 8% до 20% при $F_n = 0,275$, от 9% до 13% при $F_n = 0,24$ и от 6% до 15% при $F_n = 0,2$.
 - 1.3. при использовании вместе носовое+кормовое крылья: от 45% до 60% на $F_n = 0,275$, от 28% до 57% на $F_n = 0,24$ и от 22% до 53% на $F_n = 0,2$.
 2. При увеличении площади крыльев, рост силы тяги сопровождается ростом сопротивления, так что требуется оптимизация.
 3. Результаты показывают, что применены крыльев приводит к уменьшению дополнительного сопротивления,
 - 3.1. при использовании только носовое крыло от 53% до 60% на $F_n = 0,24$ и от 26% до 51% при $F_n = 0,2$ показывает снижение дополнительного сопротивления судна.
 - 3.2. при использовании только кормового крыла имеет место снижение дополнительного сопротивления на 47% - 65% при $F_n = 0,24$ и на 30% - 60% при $F_n = 0,2$.
 - 3.3. при использовании только кормового крыла на 70% - 80% при $F_n = 0,24$ и на 55% - 77% при $F_n = 0,2$.
 4. Индекс проектной энергетической эффективности EEDI_{weather} для судна с крыльями ниже на 6% - 13% для судна без крыльев на репрезентативных морских условиях.
- Проведенное исследование позволяет получить представление о снижении объема вредных выбросов в атмосферу при использовании судов с энергосберегающими крыльями как альтернативной технологии зеленого судна.

Литература

1. Green Shipping with Wind & Solar Power: Harnessing Solar & Wind Power for Cleaner Shipping. – (<https://www.ecomarinepower.com/en/green-shipping>).
2. Wavefoil. Full-scale experience with retractable bow foils on M/F TEISTIN. – (www.wavefoil.com)
3. Wärtsilä and Partners to Pursue Greater Fuel Efficiency in Major EU-Funded Project. – (https://www.marineinsight.com/shipping-news/wartsila-and-partners-to-pursue-greater-fuel-efficiency-in-major-eu-funded-project/?fbclid=IwAR0QO9-0_MnzJgBs8u5KnYUbgcbzpyeEQLMpXPOHxERQx4ssTMM86KA9g). – 2020. – 2 March.
4. Nils Salvesen., E. O. Tuck., O. M. Faltinsen. Ship motions and sea loads. The society of naval architects and marine engineers. November 12-13. 1970. P.30.
5. Зин Мин Хтет., Рождественский К. В. Математическое моделирование судна, движимого энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, № 1(43), стр.32-38. 2019.
6. Рождественский К.В. Математический модуль машущего крыла для задач моделирования судов, движимых энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, № 1(43), стр.46-51. 2019.
7. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. MaineRobotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. p 360-369.
8. Рождественский К.В., Зин Мин Хтет. Будущее зелёного судоходства с использованием энергии волн. Всероссийская конференция. Рождественские встречи: современные проблемы гидродинамики. Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2019.
9. Рождественский К.В., Зин Мин Хтет. Математическая модель судна с энергосберегающими крыльевыми элементами, движимого энергией волн. Научно-технический семинар «Моделирование процессов в современных морских транспортных системах». Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2020.
10. Зин Мин Хтет. Исследования особенностей снижения продольной качки и дополнительного сопротивления судна с крыльевыми устройствами. Морские интеллектуальные технологии, № 1 том 3, стр.38-50, 2020.

11. Зин Мин Хтет., Рождественский К.В. К вопросу о снижении дополнительного сопротивления судна с энергосберегающими крыльевыми элементами. Всероссийская конференция. Рождественские встречи: современные проблемы гидродинамики. Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2019.
12. Зин Мин Хтет. Определение $EEDI_{weather}$ при продольной качке судна с крыльевыми устройствами в репрезентативном состоянии моря. Морские интеллектуальные технологии, № 1 том 3, стр.30-37, 2020.
13. Зин Мин Хтет., Рождественский К.В. Оценка влияния энергосберегающих крыльевых элементов на дополнительное сопротивление судна на волнении и количество вредных выбросов в атмосферу. Научно-технический семинар «Моделирование процессов в современных морских транспортных системах». Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2020.
14. Holtrop, J. An approximate power prediction method / J. Holtrop, G.G.J. Mennen // International Shipbuilding Progress, vol. 29, no. 335, 1982, 166-170 P. DOI: 10.3233/ISP-1982-2933501.
15. International Maritime Organization, 2014a. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.245(66).
16. International Maritime Organization, 2018. 2018 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.308(73).
17. Даниловский, А. Г. Проектирование судовых энергетических установок на основе САПР: учеб. пособие / А. Г. Даниловский. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 140 с.
18. MAN Diesel & Turbo. Marine engine IMO Tier II and Tier III Programme 2015. p 202.
19. International Maritime Organization, 2012. Interim guidelines for the calculation of the coefficient f_w for decrease in ship speed in a representative sea condition for trial use. MEPC.1/Circ.796.

References

1. Green Shipping with Wind & Solar Power: Harnessing Solar & Wind Power for Cleaner Shipping. – (<https://www.ecomarinepower.com/en/green-shipping>)
2. Wavefoil. Full-scale experience with retractable bow foils on M/F TEISTIN. – (www.wavefoil.com)
3. Wärtsilä and Partners to Pursue Greater Fuel Efficiency in Major EU-Funded Project. – (https://www.marineinsight.com/shipping-news/wartsila-and-partners-to-pursue-greater-fuel-efficiency-in-major-eu-funded-project/?fbclid=IwAR0QO9-0_MnzJgBs8u5KnY_UbgcbzpzYeoEQLMpXPOHx_ERQx4ss_TMM_86KA9g). – 2020. – 2 March.
4. Nils Salvesen., E. O. Tuck., O. M. Faltinsen. Ship motions and sea loads. The society of naval architects and marine engineers. November 12-13. 1970. P.30.
5. Zin Min Htet., Rozhdestvensky K. V. Mathematical modeling of wave-powered ships. Marine Intellectual Technologies, № 1(43), p.32-38. 2019.(in Russian)
6. Rozhdestvensky K.V. Mathematical modeling of a flapping foil for modeling of wave-powered ships. Marine Intellectual Technologies, № 1(43),p 46-51. 2019. (in Russian)
7. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. Maine Robotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. p 360-369.
8. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. The future of green shipping using wave energy. Russian conference. Christmas gatherings: contemporary problems of fluid dynamics. Saint Petersburg, SMTU, 2019. (in Russian)
9. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical model of a ship with energy-saving wing elements driven by wave energy. Scientific and technical seminar "Modeling of processes in modern marine transport systems". Saint-Petersburg, SMTU, 2020.(in Russian)
10. Zin Min Htet. Study of peculiarities of reducing longitudinal motions and added resistance for a ship with wing devices. Marine Intellectual Technologies, № 1, Vol 3, p.38-50, 2020. (in Russian)
11. Zin Min Htet., Rozhdestvensky K.V. On the issue of reducing the add resistance of a ship with energy-saving wing elements. Russian conference. Christmas gatherings: contemporary problems of fluid dynamics. Saint Petersburg, SMTU, 2019. (in Russian)
12. Zin Min Htet. The determination of $EEDI_{weather}$ during the longitudinal motion of a ship with wing devices in a representative sea condition. Marine Intellectual Technologies, № 1, Vol 3, p.30-37, 2020. (in Russian)
13. Zin Min Htet., Rozhdestvensky K.V. Assessment of the impact of energy-saving wing elements on the add resistance of the vessel in waves and the amount of harmful emissions into the atmosphere. Scientific and technical seminar "Modeling of processes in modern marine transport systems". Saint-Petersburg, SMTU, 2020.(in Russian)
14. Holtrop, J. An approximate power prediction method / J. Holtrop, G.G.J. Mennen // International Shipbuilding Progress, vol. 29, no. 335, 1982, 166-170 P. DOI: 10.3233/ISP-1982-2933501.
15. International Maritime Organization, 2014a. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.245(66).
16. International Maritime Organization, 2018. 2018 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.308(73).
17. Danilovsky. A. G. CAD-based design of marine power plants: study guide / A. G. Danilovskiy. – SPb.: SMTU, 2014. – p 140 . (in Russian)
18. MAN Diesel & Turbo. Marine engine IMO Tier II and Tier III Programme 2015. p 202.
19. International Maritime Organization, 2012. Interim guidelines for the calculation of the coefficient f_w for decrease in ship speed in a representative sea condition for trial use. MEPC.1/Circ.796.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирилл Всеволодович Рождественский, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, проректор по международному сотрудничеству в области науки и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kvrxmas@yahoo.com

Kirill V. Rozhdestvensky, Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for International Science and Education, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kvrxmas@yahoo.com

Зин Мин Хтет, аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Zin Min Htet, Ph.D student, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Saint-Petersburg State marine technical university Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.12.001.2:681.518

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.036>

Примеры реализации полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов морской техники и морской инфраструктуры

А.В. Алексеев¹, e-mail: iapbgks@bk.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Стремительный рост сложности современных объектов морской техники и морской инфраструктуры, ужесточение требований к качеству процессов их создания и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла обуславливают особую необходимость поиска инвариантных к специфике условий эксплуатации технических и технологических решений. Соответственно, моделей их оценки, анализа, синтеза, оптимизации, исследовательского проектирования и обоснования их свойств и характеристик, включая количественный анализ конкурентной способности, перспективности и путей их технологического развития. В развитие ранее представленных модели и методики инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры рассмотрены конкретные примеры реализации разработанного Полимодельного квалиметрического метода системной оптимизации объектов исследовательского проектирования. Включая оценку и мониторинг технической готовности объектов критической инфраструктуры, отдельных кораблей и их соединений, систем управления оружием и техническими средствами, электроэнергетических систем, автоматизированных систем управления в защищенном исполнении, автоматизированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: исследовательское проектирование, инвариантность, объекты критической инфраструктуры, интегрированные системы управления, синтетическая квалиметрия управления.

Examples of implementation of a multi-model qualimetric method for system optimization of marine engineering and marine infrastructure facilities

Anatoly V. Alekseev¹ e-mail: iapbgks@bk.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The rapid increase in the complexity of modern marine equipment and marine infrastructure, the tightening of requirements for the quality of the processes of their creation and operation at all stages of the life cycle make it particularly necessary to find technical and technological solutions that are invariant to the specifics of the operating conditions. Accordingly, models of their evaluation, analysis, synthesis, optimization, research design and justification of their properties and characteristics, including a quantitative analysis of their competitive ability, prospects and ways of their technological development. In the development of the previously presented model and methodology for invariant assessment of the quality and efficiency of marine engineering and marine infrastructure objects, specific examples of the implementation of the developed Polymodel qualimetric method for system optimization of research design objects are considered. Including assessment and monitoring of the technical readiness of critical infrastructure facilities, individual ships and their connections, weapons and technical equipment control systems, electric power systems, automated control systems in a secure design, automated intelligent decision support systems.

Key words: research design, invariance, critical infrastructure objects, integrated control systems, synthetic control qualimetry.

Введение

В развитие ранее представленного в [1] Полимодельного квалиметрического метода (ПКМ) системной оптимизации объектов исследовательского проектирования (ОИП), а также математической модели [1] и методики [2] инвариантной оценки качества и эффективности ОИП рассмотрим различные по структуре и специфике функционирования варианты их реализации. Это позволит оценить практические возможности, свойства, преимущества и ограничения ПКМ, сформулировать соответствующие рекомендации по его использованию, прежде всего, в объекты критической инфраструктуры, корабли и их соединения, корабельные и судовые электроэнергетические системы (СЭС), автоматизированные системы в защищенном исполнении (АСЗИ), системы управления оружием и техническими средствами (СУ ОТС) и многие другие

объекты морской техники (ОМТ) и морской инфраструктуры (ОМТИ).

В современных условиях лавинообразного роста сложности ОМТИ эта проблема представляется нам одной из весьма сложных, но одновременно самых востребованных и значимых для решения задач системного проектирования [1, 2, 3].

1. Системный анализ и синтез качества объектов морской техники и морской инфраструктуры

При анализе и синтезе новых системных и технических решений, технологических путей развития современных структурно сложных комплексов и систем в составе ОМТИ приходится учитывать большое число групповых показателей качества (ГПК), отражающих свойства ОМТИ. Каждый из них оценивается с использованием также большого числа измеряемых, либо оцениваемых экспертами частных показателей качества (ЧПК). Без их систематизации и количественной оценки

практически не представляется возможным принимать обоснованные решения по выявлению, а, тем более, оптимизации системных, технических и технологических путей развития ОМТИ.

Еще большее значение задача системного анализа и синтеза качества проектируемых (модернизируемых) и эффективности эксплуатируемых ОМТИ имеет для **объектов критической инфраструктуры** (ОКИ), выход, из строя которых (запредельное снижение заданных требований) может привести не только к прекращению функционирования объекта и их систем в целом, но и к чрезвычайным ситуациям с угрозой для жизни и здоровья как обслуживающего персонала, так и населения, может вызывать значительные экологические и социальные последствия.

Среди типовых объектов морской критической инфраструктуры (МКИ), а также угроз их поражения могут быть названы:

объекты массового скопления людей, персонала типа круизных лайнеров, паромов, портов (пожары, взрывы, ракетные и артиллерийские атаки, химические, биологические и радиационные атаки);

объекты атомной электроэнергетики типа атомных станций, плавучих энергоблоков и электростанций (авиационные атаки, атаки беспилотных летательных аппаратов, нарушения регламентов эксплуатации реакторов, диверсионные акты);

объекты морской нефтегазодобычи и трубопроводов типа морских стационарных ледостойких платформ (ракетно-артиллерийские, авиационные и диверсионные атаки, техногенные катастрофы, нарушения регламентов эксплуатации);

объекты морской критической информационной инфраструктуры (МКИИ) типа центров и пунктов управления, ситуационных центров, центров связи, массовых телекоммуникаций, центров обработки данных, радиоцентров, телецентров (информационные инциденты, вторжения, электромагнитные атаки, террористические акты);

объекты водоснабжения (микробиологическое или химическое загрязнение, диверсионные акты, ракетно-артиллерийские атаки);

объекты градостроения и природопользования типа высотных зданий, плотин (подрыв, авиационные атаки, атаки подводных лодок, надводных кораблей, беспилотных аппаратов);

объекты хранения и распределения горючесмазочных материалов (пожары, взрывы);

объекты радиационного, биологического и химического назначения (взрыв, пожары, диверсии);

объекты административного и жилого назначения портов и военно-морских баз (взрывы, авиационные и корабельные атаки, диверсии).

В этой связи в контексте предложенного ПКМ ОИП модель живучести ОКИ типа судна (корабля) может быть представлена с учетом (1) из [1] в виде

$$Q_{ж} = C_{k,4}^{\Gamma} \{w_m, C_{m,5}^{\Gamma} [w_g, C_{g,50}^{\Gamma} (w_n, q_n)]\}, \quad (1)$$

где представленный агрегированный (системный, интегральный, обобщенный) показатель (АПК)

живучести судна (ЖС) $Q_{ж}$ определяется свёрткой n -ых частных показателей качества (ЧПК) с их общим числом порядка $N > 50$ при соответствующих индексах критериальной значимости (ИКЗ, весовых коэффициентах) w_n в $G=5$ групповых показателей качества (ГПК), определяющие основные факторы (свойства, компоненты) живучести судна: непотопляемость k -го судна (НС); взрыво-пожаро-радиационную безопасность судна (ВПРБ); живучесть технических средств и оружия (ЖТС); безопасность пассажиров и службы экипажа судна (БПЭ); качество управления системой обеспечения безопасной эксплуатации (ОБЭ), локализации аварийных ситуаций и аварий (ЛА), борьбы за живучесть судна в целом (УЖС).

В свою очередь, 5 ГПК агрегируются в $M=4$ модельных показателей качества (МПК), после чего - в соответствующий и единственный для каждого судна (корабля) АПК ЖС, позволяющий оценивать как проектное значение ЖС на стадии НИОКР, так и агрегированный показатель эффективности (АПЭ) при эксплуатации судна (корабля) и соответствующих эксплуатационных значениях ЧПК.

В качестве полимодельных факторов и соответствующих ИКЗ w_m могут быть рассмотрены 4 типовые стадии функционирования судна (корабля) с соответствующей матрицей ИКЗ: подготовки выхода судна в море; перехода в район предназначения; решения поставленных задач в районе предназначения; возвращения в порт (базу).

Среди других вариантов полимодельного оценивания могут быть различные по значениям ИКЗ их комбинации, задаваемые судовладельцем (командиром корабля, соединения кораблей) и учитывающие специфику условий применения судна (корабля, корабля в составе соединения кораблей).

Для 10 основных подсистем объекта морской техники класса «Корабль» в соответствии с рис. 3 из [2] модель АПК может быть представлена в виде

$$Q_{к,э,к} = C_{k,7}^{\Gamma} \{w_m, C_{m,9}^{\Gamma} [w_g, C_{g,350}^{\Gamma} (w_n, q_n)]\}, \quad (2)$$

где представленный АПК проектного качества $Q_{к,к}$, либо эффективности боевого применения $Q_{э,к}$, определяется свёрткой более чем 350 (уточняется для конкретного проекта) при соответствующих ИКЗ w_n в $G=9$ ГПК, определяющие основные свойства соответствующих подсистем корабля: экипаж; управление; навигация, связь, сигнализация; целевая подсистема; корпус и надстройка; движение; энергия; маневрирование; стабилизация.

Соответственно 9 ГПК агрегируются в $M=7$ МПК (например, по числу решаемых задач по предназначению), после чего - в соответствующий АПК -го корабля. Сопоставление АПК соответствующих проектов кораблей позволяет определить с использованием моделей (3) и (4) из [1] соответствующее их взаимное конкурентное превосходство (см. рис. 1 в [1], рис. 4 в [2]),

обоснованно определять роль и место каждого в составе групп, соединений кораблей.

При этом оценка АПК для групп и соединений кораблей приобретает еще большую значимость, а при наличии соответствующих автоматизированных расчетных модулей и систем поддержки принятия решений (АСППР) при многовариантном анализе и синтезе позволяет решать эту весьма сложную задачу вариантной оптимизации в форме вполне доступного и результативного процесса.

Так, например, процесс мониторинга технической готовности (ТГ) корабля и эффективности решения каждой из обеспечивающих ТГ задач позволяет количественно контролировать и соответствующим образом управлять реализацией потенциала (проектного качества) каждой тактической единицы и их соединения. Для иллюстрации ниже приведены результат числового (цифрового) моделирования процессов агрегирования данных при оценке заданной (столбец таблицы «Качество, %») и фактической (столбец «Дата») технической готовности корабля (рис. 1), а также соединения кораблей (рис. 2). Для оценки статистической надежности данные представлены с учетом введенного значения коэффициента вариации относительно заданных данных (столбец «ЧФ, %», аналог учета так называемого «человеческого фактора») [4].

ПК "СПРУ-СК": ТЕХНИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ МПК-1 "Муромец" (064)		Требование	Дата:	
Критерий и размерность оценки фактора	Важность	Кач-во, %	73.3.21	ЧФ, %
1. Техническая готовность к использованию, %	45%	87,8	88,1	0,70%
1.1. ТГ корпуса, %	15%	80	81,7	7%
1.2. ТГ оружия, %	30%	90	92,1	5%
1.3. ТГ технических средств (ТС), %	15%	87	88,5	5%
1.4. ТГ средств БЖ, %	25%	90	87,0	8%
1.5. Состояние уровней ФП (защита скрыта), %	10%	90	89,8	5%
1.6. Укомплектованность О-ЗИП-МТС, %	5%	85	84,2	5%
2. Исправность и грамотная эксплуатация корпуса, ОИТС, качество ЭД%	25%	85,0	84,9	0,82%
3. Своевременность и качество технического обслуживания (ТО), %	20%	88,2	89,3	1,06%
3.1. ППТО (планово-предупредит-е), %	25%	85	86,8	5%
3.2. ППР (планово-предупр. ремонты), %	25%	88	90,3	8%
3.3. МПР (межпоходовые), %	20%	90	91,3	5%
3.4. НР (навигационные ремонты), %	20%	90	88,6	5%
3.5. Обслуживание по тех. состоянию, %	10%	90	90,8	7%
4. Сохраняемость корабля, %	5%	88	87,8	0,34%
5. Другие показатели ТГ корабля, %	5%	90	89,9	0,28%
АПК "Ожидаемая ТГ корабля" (ТГ), %:		87,3		4,26%
АПК "Фактическая ТГ корабля" (ТГф), %:			87,60	2,46%
Надежность оценки АПК (среднее по 30 реализациям) коэффициента вариации Kvar_АПК=100*СКО/МО, %:		0,0013%	0,28%	0,60%
				Дата:
Эксперты: Алексеев А.В., Прудниченко П.С. 21.03.2021				

Рис. 1 - Пример автоматизированной оценки технической готовности корабля

При этом, обоснование системы критериев оценки ТГ корабля выполнено на основе межгосударственного стандарта ГОСТ 19176-85 [5].

ПК "СПРУ-СК": ТЕХНИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ 68 БрКОВР, ВМБ "Севастополь"		Требование	Дата:	
Критерий и размерность оценки фактора	Важность	Кач-во, %	11.3.21	КВ, %
1. Техническая готовность БрКОВР к применению, %	45%	87,40	87,3	0,82%
1.1. МПК-1, %	20%	87,3	86,5	0,67%
1.2. МПК-2, %	20%	86,1	85,8	0,75%
1.3. МПК-3, %	20%	87,8	87,6	0,92%
1.4. МТЦ-1, %	15%	88,0	88,3	0,88%
1.5. МТЦ-2, %	15%	87,8	87,9	0,91%
1.6. УТК "Гефест", %	10%	88,1	88,4	0,79%
2. Исправность и грамотная эксплуатация ОИТС БрКОВР,	25%	84,28	87,20	0,79%
3. Своевременность и качество технического обслуживания (ТО)	20%	85,42	86,50	0,82%
3.1. ППТО (планово-предупредит-е), %	25%	85,0	89,16	0,69%
3.2. ППР (планово-предупр. ремонты), %	25%	88,0	86,77	0,86%
3.3. МПР (межпоходовые ремонты), %	20%	80,0	83,34	0,91%
3.4. НР (навигационные ремонты), %	20%	86,0	85,61	0,79%
3.5. Обслуживание по тех. состоянию, %	10%	90,0	87,39	0,83%
4. Сохраняемость КОВР, %	5%	90,00	91,61	0,92%
5. Другие показатели ТГ БрКОВР, %	5%	90,00	92,53	0,83%
АПК "Ожидаемая ТГ БрКОВР" (ТГс), %:		86,47		0,95
АПК "Фактическая ТГ БрКОВР" (ТГсф), %:			87,6	0,81
Надежность оценки АПК (среднее по 30 реализациям) коэффициента вариации Kvar_АПК=100*СКО/МО, %:		0,043%	0,38%	0,813%
				Дата:
Эксперты: Алексеев А.В., Прудниченко П.С. 19.03.2021				

Рис. 2. Пример автоматизированной оценки технической готовности соединения кораблей

Приведенные данные показывают, что при несложной автоматизации процессов оценивания ГПК, АПК это обеспечит возможность непрерывной оценки, мониторинга, контроля ТГ каждого корабля и соединения в целом, а также возможность количественного (квалиметрического) обоснования и принятия эффективных управленческих и корректирующих решений по управлению ТГ.

При этом, существенно упрощается и реализуется в реальном масштабе времени объективный контроль обстановки по каждому кораблю и их соединению с фактическим исключением влияния негативных свойств ЧФ за счет реализации принципа прозрачности используемых исходных данных и их влияния на ТГ.

Тем самым, рассматриваемый Полимоделный квалиметрический метод инвариантной оценки качества и эффективности ОМТИ позволяет реализовать парадигму системного подхода с переходом от оценивания их отдельных показателей качества к системным групповым показателям качества (отражают системные свойства объекта анализа), к модельным показателям качества (отражают полимоделную многоаспектность анализа). И, наконец, к единому (интегральному) АПК ОМТИ, который характеризует количественно проектное качество $Q_{К,к}$ (при эксплуатации – эффективность $Q_{Э,к}$) объекта анализа в целом, максимизацию которого следует рассматривать в качестве основного направления синтеза и оптимизации ОМТИ с использованием ПКМ системной оптимизации ОИП. Именно эту особенность ПКМ рассмотрим далее отдельно.

2. Реализация ПКМ при исследовательском проектировании корабельных средств

Применительно к задаче исследовательского проектирования ОМТ [6, 7, 8] класса «Корабль» (судно) с целью концептуального обоснования облика, свойств и основных системных элементов для иллюстрации исключительно возможности использования ПКМ в развитие примеров сравнительного анализа ледоколов [1], больших противолодочных кораблей [2] на рис. 3 приведен фрагмент результатов цифрового моделирования и сравнительного анализа многоцелевых подводных лодок (МПЛА) по исходным данным, в полном объеме заимствованным из Интернета.

Критерии оценки качества \ Варианты ОМТ	ИКС3, %	Z	ИТУ	Wartsila	RRBergen	MAN D&T	Winterthur G&D
Год введения в эксплуатацию первого газозава СПГ с ЭУ данного типа			1964	2003	2009	2017	2017
Конкурентная способность, доли	-	-	0,893	1,000	1,025	1,025	1,088
КС по мультипликативной модели, КСм, доли	-	-	0,889	1,000	1,025	1,024	1,076
КС по аддитивной модели, КСа, доли	-	-	0,897	1,000	1,025	1,027	1,101
1. Обеспечиваемая полезная грузоподъемность, доли	40%	1	0,964	1,000	1,029	1,032	1,076
1.1. Эксплуатационная скорость хода, ед.	70%	1	1,001	1,000	1,000	0,997	0,995
1.2. Часовой расход ПГ ГЭУ, ед.	15%	-1	1,135	1,000	0,975	0,817	0,686
1.3. Суточный вылет груза, ед.	10%	-1	1,133	1,000	0,800	0,800	0,800
1.4. Часовой расход ПГ ВЭУ, ед.	5%	-1	1,133	1,000	0,977	1,633	1,175
2. Стоимость владения, ед.	20%	1	0,949	1,000	1,037	1,086	1,222
2.1. Численность экипажа, ед.	40%	-1	0,778	1,000	1,000	0,956	0,956
2.2. Часовые затраты на топливо ГЭУ, ед.	40%	-1	1,723	1,000	0,965	0,855	0,675
2.3. Построечная стоимость ЭУ, ед.	20%	-1	0,854	1,000	0,898	0,995	0,912
3. Эффективность ГЭУ, %	20%	1	0,876	1,000	1,011	1,024	1,160
3.1. Производственная мощность ЭУ, ед.	60%	-1	1,003	1,000	0,998	0,920	0,913
3.2. Удельный расход энергии топлива ГЭУ, ед.	30%	-1	1,600	1,000	0,969	0,906	0,748
3.3. Затраты электроэнергии на ГЭУ, ед.	10%	-1	1,001	1,000	0,999	1,951	0,955
4. Эффективность ВЭУ, %	10%	1	0,878	1,000	1,010	0,835	0,556
4.1. Номинальная мощность вспомогательных СЭ, ед.	35%	-1	1,001	1,000	0,999	1,757	2,938
4.2. Эксплуатационная мощность специальных потребителей электроэнергии, ед.	35%	-1	1,000	1,000	1,000	1,000	2,109
4.3. Удельный расход энергии топлива СЭ, ед.	30%	-1	1,600	1,000	0,969	1,000	1,000
5. Экологичность, %	10%	1	0,586	1,000	1,033	1,086	1,383
5.1. ИКЭЭ, ед.	75%	-1	1,725	1,000	0,968	0,869	0,651
5.2. Массовая доля ПГ в топливной смеси, ед.	20%	1	0,707	1,000	1,010	0,977	1,005
5.3. Производительность по NOx, ед.	5%	-1	3,529	1,000	0,887	1,558	1,163
Конкурентная способность (КР), %	8	1	0,893	1,000	1,025	1,025	1,088
Эксперт: Голубев Р.О. Ранжирование оценок, R	5	4	3	2	1		
Перспективность развития (ПР) в сравнении с вариантом 1, %	1,000	1,220	1,148	1,148	1,219		

Рис. 3 - Пример автоматизированной оценки перспективности развития МПЛА

На рис. 4 в результате аналогичных оценок с использованием ПКМ системной оптимизации ОИП приведен график сравнительных оценок проектного качества 5 альтернативных вариантов двигателей внутреннего сгорания, среди которых при соответствующих исходных данных с конкурентным превосходством в $KП = Q_3/Q_2 - 1 = 0,80/0,59 - 1 = 35,5\%$ в качестве оптимального по модели «M11-Полимоделная АМ» признано целесообразным считать вариант агрегата «3.Wartsila 12V34DF» производства финской промышленной компании «Wartsila Oyj Abp.» в сравнении с вариантом «2.MAN 14V32/40» производства немецкого концерна «MAN Global Corp.».



Рис. 4 - Пример автоматизированной оценки сравнительного качества судовых двигателей

Аналогично на рис. 5 приведен график сравнительных оценок проектного качества 5

альтернативных вариантов судовых энергетических установок, среди которых при соответствующих исходных данных с конкурентным превосходством в $KП = Q_5/Q_4 - 1 = 1,088/1,025 = 6,1\%$ в качестве оптимального признано целесообразным считать вариант «Winterthur G&D» в сравнении с вариантом «MAN G&D».

Критерии оценки качества \ Варианты ОМТ	ИКС3, %	Z	ИТУ	Wartsila	RRBergen	MAN D&T	Winterthur G&D
Год введения в эксплуатацию первого газозава СПГ с ЭУ данного типа			1964	2003	2009	2017	2017
Конкурентная способность, доли	-	-	0,893	1,000	1,025	1,025	1,088
КС по мультипликативной модели, КСм, доли	-	-	0,889	1,000	1,025	1,024	1,076
КС по аддитивной модели, КСа, доли	-	-	0,897	1,000	1,025	1,027	1,101
1. Обеспечиваемая полезная грузоподъемность, доли	40%	1	0,964	1,000	1,029	1,032	1,076
1.1. Эксплуатационная скорость хода, ед.	70%	1	1,001	1,000	1,000	0,997	0,995
1.2. Часовой расход ПГ ГЭУ, ед.	15%	-1	1,135	1,000	0,975	0,817	0,686
1.3. Суточный вылет груза, ед.	10%	-1	1,133	1,000	0,800	0,800	0,800
1.4. Часовой расход ПГ ВЭУ, ед.	5%	-1	1,133	1,000	0,977	1,633	1,175
2. Стоимость владения, ед.	20%	1	0,949	1,000	1,037	1,086	1,222
2.1. Численность экипажа, ед.	40%	-1	0,778	1,000	1,000	0,956	0,956
2.2. Часовые затраты на топливо ГЭУ, ед.	40%	-1	1,723	1,000	0,965	0,855	0,675
2.3. Построечная стоимость ЭУ, ед.	20%	-1	0,854	1,000	0,898	0,995	0,912
3. Эффективность ГЭУ, %	20%	1	0,876	1,000	1,011	1,024	1,160
3.1. Производственная мощность ЭУ, ед.	60%	-1	1,003	1,000	0,998	0,920	0,913
3.2. Удельный расход энергии топлива ГЭУ, ед.	30%	-1	1,600	1,000	0,969	0,906	0,748
3.3. Затраты электроэнергии на ГЭУ, ед.	10%	-1	1,001	1,000	0,999	1,951	0,955
4. Эффективность ВЭУ, %	10%	1	0,878	1,000	1,010	0,835	0,556
4.1. Номинальная мощность вспомогательных СЭ, ед.	35%	-1	1,001	1,000	0,999	1,757	2,938
4.2. Эксплуатационная мощность специальных потребителей электроэнергии, ед.	35%	-1	1,000	1,000	1,000	1,000	2,109
4.3. Удельный расход энергии топлива СЭ, ед.	30%	-1	1,600	1,000	0,969	1,000	1,000
5. Экологичность, %	10%	1	0,586	1,000	1,033	1,086	1,383
5.1. ИКЭЭ, ед.	75%	-1	1,725	1,000	0,968	0,869	0,651
5.2. Массовая доля ПГ в топливной смеси, ед.	20%	1	0,707	1,000	1,010	0,977	1,005
5.3. Производительность по NOx, ед.	5%	-1	3,529	1,000	0,887	1,558	1,163
Конкурентная способность (КР), %	8	1	0,893	1,000	1,025	1,025	1,088
Эксперт: Голубев Р.О. Ранжирование оценок, R	5	4	3	2	1		
Перспективность развития (ПР) в сравнении с вариантом 1, %	1,000	1,220	1,148	1,148	1,219		

Рис. 5 - Сравнительная оценка судовых энергетических установок

Анализируя приведенные примеры в первую очередь требует ответа вопрос об адекватности используемой модели и ПКМ в целом, которая, как известно, определяется: адекватностью модели (достаточностью и точностью отображения свойств ОМТИ); конечностью (числа отображаемых отношений ОМТИ и их свойств); информативностью (полнотой гипотез при построении модели); безизбыточностью (невозможностью сокращения данных без потери качества моделирования существенных свойств ОМТИ); функциональной гибкостью (возможностью воспроизведения специфических особенностей построения и функционирования ОМТИ) и ресурсной доступностью (приемлемой трудоемкостью, временных и материально-финансовых затрат для достижения цели).

В этой связи отмечая дополнительно важное свойство ПКМ в части ярко выраженной функциональной гибкости, обусловленной инвариантностью ПКМ к специфическим условиям функционирования ОМТИ, а также выигрышной ресурсной доступностью исследуем важнейшее модельное требование адекватности. Это требование определяется необходимостью и достаточностью используемых исходных данных при моделировании свойств ОМТИ, а также точностью отображения свойств, включая статистическую устойчивость получаемых оценок.

3. Результаты анализа погрешностей оценивания качества и эффективности при реализации ПКМ системной оптимизации ОМТИ

Многочисленные и многовариантные оценки и исследования АПК разнородных ОМТИ [1-4, 8-14], а также, например, приведенных выше показателей типа «Функциональность оружия и ТС корабля» в функции соответствующих ГПК и ЧПК, включая статистический учет погрешностей задания исходных данных (в т.ч. аналога влияния («человеческого фактора») типа погрешностей оценки показателей качества операторами в третьей графе рис. 1, 2 показало:

- при переходе к системному анализу, синтезу и оптимизации ОИП на основе агрегирования многочисленных ЧПК, ГПК, МПК к критически важным аспектам исследований относится оценка погрешностей, статистическая надежность, достоверность оценок по критерию коэффициента вариации (КВ) анализируемых показателей;
- единственным доступным, пожалуй, методом исследования данных погрешностей следует считать метод числового моделирования (цифрового эксперимента), в том числе, например, по критерию индекса снижения $ИВ_{КВ}$ по коэффициенту вариации АПК $КВ_{АПК}$ в сравнении с коэффициентом вариации ЧПК $КВ_{ЧПК}$ вида

$$ИВ_{КВ} = \frac{КВ_{ЧПК}}{КВ_{АПК}} ; \quad (3)$$

• погрешность оценки системных показателей качества (типа «1.Техническая готовность к использованию, %», «АПК «Ожидаемая ТГ корабля, %») определяется, прежде всего, погрешностью задания исходных данных по ЧПК и тем меньше, чем больше число агрегируемых показателей, определяющее результат усреднения ЧПК по их ансамблю. Как известно, аналогичная ситуация имеет место при усреднении данных по времени, по диапазону значений и т.п. Это обстоятельство следует считать весьма важным и перспективным для использования процедур скаляризации векторных критериев, агрегирования показателей качества, эффективности ОМТИ;

• при числе ЧПК порядка 7...10 значение $ИВ_{КВ}$ составляет более, чем (5...7) раз. Так, на рис. 1 при равномерном законе распределения флуктуаций значений ЧПК и среднем значении $КВ_{ЧПК}=4,26\%$ (синее поле) значение $КВ_{АПК}=0,60\%$ (коричневое поле). Это подтверждает весьма высокую достоверность (статистическую надежность) оценки АПК технической готовности корабля.

Сопоставление динамики изменения оценок ЧПК и АПК по исходным данным рис. 1 на основе статистического моделирования приведено на рис. 6 и наглядно иллюстрирует эту особенность.

В развитие этих результатов на рис. 7 представлен вариант имитационного моделирования процесса мониторинга и цветового кодирования (соответствие требованиям – зеленый цвет, угроза невыполнения требований – желтый, невыполнение требований - красный, угроза потери управления - серый) состояния оружия и ТС соединения корабля

для интервала времени в 30 циклов управления (например, 30 суток).



Рис. 6 – Динамика изменения ЧПК и АПК

Подобный вариант визуализации системных характеристик состояния оружия и ТС позволяет «в одном кадре» целостно отражать состояние ТГ корабля, идентифицировать тип процессов нарушения заданных регламентов и автоматизированного выбора соответствующих решений по управлению состоянием и обстановкой в целом при соответствующей автоматической регистрации событий и принятых решений.

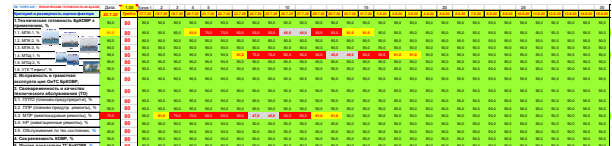


Рис. 7 – Результаты имитационного моделирования процесса мониторинга состояния корабельных технических средств

В сочетании с прогнозированием данных обстановки (слева от «белого столбца» текущих данных) это дает практически полный образ (модель) динамики развития обстановки по объективным данным, поступающим от соответствующих диагностических средств, датчиков работоспособности средств с общим числом порядка 3 тысяч для кораблей (порядка 2 тысяч для судов).

Инвариантность ПКМ к специфике объектов анализа позволяет и побуждает решать в общем виде как задачу анализа качества и эффективности ОМТИ, так и задачу синтеза управленческих решений при их исследовательском проектировании и создании ОМТИ с оценкой и реализацией проектного качества и эффективности реализации проектного качества (при эксплуатации).

4. Метод системной оптимизации объектов исследовательского проектирования

Одним из подобных обобщенных методов синтеза ОИП [9-15] следует считать метод оценки и использования индексов корневой чувствительности (ИКЧ) $\frac{\Delta Q_v/Q}{\Delta q/q_v}$ за счет варьирования параметрами и синтеза квазиоптимального варианта ОМТИ с номером $J_{Copt}^{КЧ}$, соответствующим аргументу функции максимизации АПК $Q_j^{КР}$ с учетом максимума ИКЧ, на основе алгоритма (7.4) [1] вида

$$J_{Copt}^{КЧ} = ArgMax_j \left\{ Q_j^{КР} \left[Max_v \left(\frac{\Delta Q_v/Q}{\Delta q/q_v} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

В основе оценки ИКЧ лежит отношение относительного приращения АПК $\Delta Q_v/Q$ к относительному приращению ЧПК $\Delta q/q_v$ с выявлением номера -го ЧПК q_v , который обеспечивает максимальное значение данного ИКЧ.

Для иллюстрации на рис. 8 применительно к условиям рис. 1 приведен график ИКЧ, анализ которого показывает целесообразность наращивания АПК ТГ корабля в приоритетном (ранжированном) порядке следования ЧПК: «5. Живучесть СУ ОТС (системы управления общекорабельными техническими средствами) корабля, %»; «2.1. Безаварийность (безопасность) функционирования ТС корабля, %»; «4. Отказоустойчивость СУ ТС корабля, %» и далее.



Рис. 8 – Результаты оценки индексов корневой чувствительности к данным рис. 1

Одной из практических рекомендаций по управлению проектным качеством и эффективностью эксплуатации ОМТИ в этой связи может быть распределение, например, выделяемого ресурса на модернизацию пропорционально значениям ИКЧ. Это позволит получить, как можно показать, максимальную инвестиционную отдачу при модернизации ОМТИ в предположении равной стоимости модернизационных технических решений.

Другой практической рекомендацией по реализации ПКМ следует считать переход от одиночных оценок качества и эффективности ОМТИ в процессе их исследовательского проектирования к их многовариантному сравнительному анализу, синтезу и оптимизации с использованием единых методик инвариантного оценивания и соответствующих программных комплексов в составе автоматизированных систем поддержки проектных и управленческих решений (АСППР).

Наконец, при эксплуатации ОМТИ одной из основных практических рекомендаций по реализации ПКМ следует считать переход от одиночных оценок эффективности к их непрерывному наблюдению (мониторингу) с целью системного анализа обстановки и динамики развития обстановки по АПК, ГПК и ЧПК.

Это позволяет наряду с сокращением избыточности визуализации данных за счет перехода к мониторингу наиболее ценных (системно значимых) данных (АПК и ГПК в сравнении с ЧПК)

перейти к формированию квалиметрических баз данных и новых (когнитивных) знаний (КБДЗ).

Кроме того, перейти к формированию соответствующих баз вариантов решений с прогнозированием их качества, соответствующим ранжированием и выбором наиболее эффективных в соответствии с конкретной обстановкой и конкретными сценариями процессов.

Эти и другие возможности и рекомендации по реализации ПКМ системной оптимизации, управления проектным качеством и эффективностью эксплуатации ОМТИ получают сегодня свое развитие при создании нового поколения АСППР в варианте интеллектуальных систем поддержки решений и управления (ИСПРУ), к анализу которых и перейдем далее.

5. Реализация ПКМ при развитии АСППР

Класс АСППР в составе разнородных автоматизированных систем управления в ходе своего развития имеет много вариантов реализации, но их главное предназначение – создание информационно комфортной обстановки для лиц, обосновывающих (ЛОР) и принимающих решения (ЛПР), а также нейтрализация их негативных субъективных свойств и принятия неэффективных решений в следствие, например, ошибок, неквалифицированной оценки обстановки, наличия субъективных (неадекватных) предпочтений и мотивации, ограничения психофизиологических возможностей по обработке больших массивов данных, результатов рефлексивного воздействия.

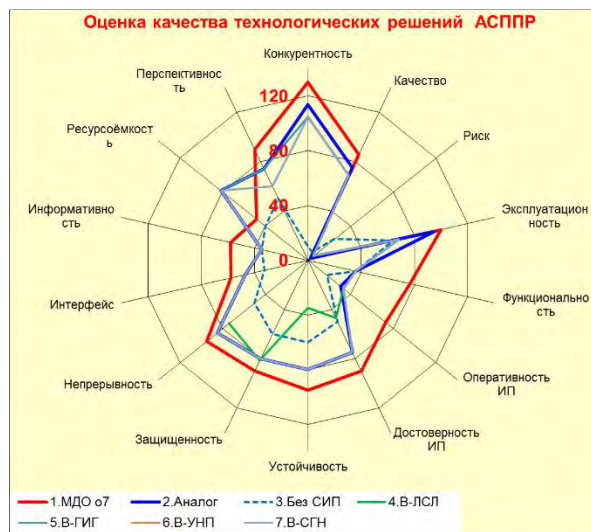


Рис. 9 – Результаты вариантной оптимизации ИСПРУ «СПРУ о7» по данным ОКР «Поддержка-У»

На рис. 9 в соответствии с моделью (1) приведены результаты оценки проектного качества 5 альтернативных вариантов АСППР [16, 17], полученные в процессе исследовательского проектирования (ИП) АСППР по управлению ОБЭ, ЛА, БЖС и отражающие динамику их развития:

вариант «1.МДО о7» – Макетный действующий образец ПК «СПРУ о7» (ОКР «Поддержка-У»);

вариант «2.Аналог» – принятый за базу при сравнении альтернативных вариантов;

вариант «3.Без СИП» – проектное качество корабельной АСЗИ при отключенной Системе информационной поддержки (СИП);

варианты от «4.В-ЛСП» до «7.В-СГН» – варианты экспертного проектного синтеза на первой стадии ИП АСППР по ОКР «Поддержка».

Представленный график проектного качества вариантов АСППР иллюстрирует проблему сложности решения задач многокритериального и полимодельного ИП, а также результативность использования аппарата ПКМ при системной оптимизации объектов ИП класса АСППР при оптимизации ПК в процессе синтеза варианта ИСПРУ «1.МДО о7» (результат вариантной оптимизации) [17].

Одним из преимуществ данного вида АСППР является формирование в процессе создания и непрерывная актуализация в процессе эксплуатации КБДЗ. Фрагмент экранной формы ввода вариантов управленческих решений приведен на рис. 10 [18].

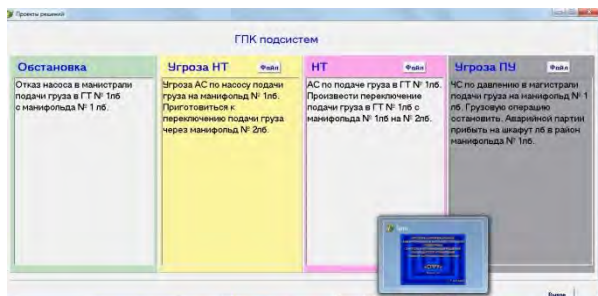


Рис. 10 – Синтез вариантов проектных решений по технологии программного комплекса «СПРУ-ЛА»

Соответствующая рис. 10 КБДЗ формируется в процессе проектирования и последующего освоения и использования КБДЗ на основе, в первую очередь, всего комплекса организационно-распорядительной и нормативно-методической документации, опыта эксплуатации, ОБЭ, ЛА и БЖ в соответствии с данными мониторинга, прогнозирования, контроля.

Опыт формирования подобных КБДЗ применительно к конкретным условиям функционирования разнородных ОИП и многообразию соответствующих ситуаций показал, что спектр проектов уникальных управленческих решений операторов (ЛОР, ЛПР, ЛИР - лиц, исполняющих решения) является далеко не широким. Это является следствием большого числа действующих регламентов и не требует в отличие от используемых дискреционных алгоритмов каких-либо «особо интеллектуальных», например, не интерпретируемых нейросетевых алгоритмов [19].

Причем, чем выше иерархический уровень ЛПР, тем, действительно, более ответственными и рискованными являются принимаемые ими решения, спектр вариантов которых резко сужается.

В качестве аналога можно привести современную медицину, где, не смотря на высочайший уровень системной сложности организма человека, имеет место устойчивая тенденция перехода к единым методикам лечения, включая международную их сертификацию, совершенствование регламентов диагностирования.

В этих условиях алгоритм принятия решений в АСППР должен, прежде всего, обеспечивать максимально оперативный (своевременный, в кратчайшие сроки) выбор максимально обоснованного варианта решения (практически безальтернативно – из состава КБДЗ) по уровню проектного значения АПК с минимальной погрешностью вариантного выбора (тем меньшей, чем больше множество альтернатив). При этом важнейшим условием оптимального выбора решения является обеспечение максимально возможной достоверности исходных данных.

Технологическая инвариантность ПКМ к специфике объектов и синтеза вариантов исследовательского проектирования обосновывает возможность и необходимость перехода к задаче оптимизации проектных и управленческих решений по алгоритму (8.1) [1], суть которого сводится к:

- полимодельному анализу результатов числового моделирования с соответствующей взаимной верификацией оценок, модельных предпочтений, матриц ИКЗ и моделей в целом,
- актуализацией частных моделей, условий и оценок АПК (КПК, ПСПК), а также

• многокритериальной и полимодельной оптимизацией вариантов проектных и управленческих решений с соответствующим номером оптимального варианта J_{opt} в модели (8.1).

Среди множества факторов и оценок, учитываемых при принятии многокритериального решения, но не нашедших отражения в модели (8.1), как показывает практика, особое значение имеют данные динамики параметров обстановки и их мониторинга. Именно поэтому на главной экранной форме, например, технологии СПРУ (рис. 11 [17, 18]) по существу центральное место занимает поле мониторинга данных обстановки.

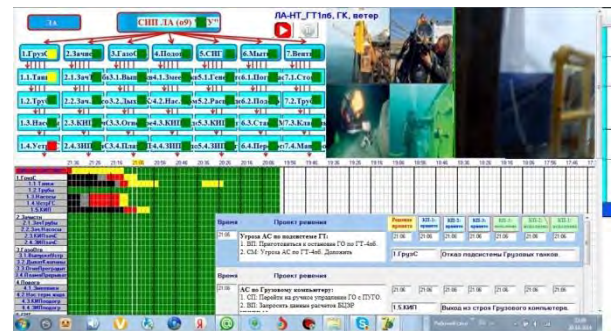


Рис. 11 - Главная экранная форма ИСПРУ «СПРУ-ЛА»

В обобщенном виде основные отличия технологии ИСПРУ «СПРУ-ЛА», как одного из конкурентных вариантов ОМТИ класса «АСППР», приведены на рис. 12.

Главным принципом визуализации данных системной обстановки, заложенным при ИП в структуру данной экранной формы ИСПРУ, выбран принцип минимизации избыточности информации, т.к. его в полной мере можно и следует относить к главному требованию по эргономической оптимизации АСППР, ИСПРУ.

Основные отличия технологии «СПРУ»

1. Непрерывный мониторинг системных параметров ОБЗ, ЛА и БЖ судна в целом.
2. Прогнозирование состояния и развития АС с упреждением во времени до 32 минут.
3. Минимизация избыточности представления оператору данных мониторинга:
 - по составу данных (системная значимость, структурно-графическая форма);
 - по количеству (2-х битовый контроль, цикличность, адаптивность);
 - по ценности данных (проекты решений, квалиметрическое обоснование).
4. Системная оптимизация экранных интерфейсных форм (психофизиологическая комфортность за счет эмерджентного комплексирования средств графической, структурной, видео-, аналитической, интеллектуальной, управленческой поддержки).
5. Минимизация числа принимаемых решений (полнота автоматизации процедур).
6. Технологическая отработка алгоритмов и вариантов ИСППР с использованием комплекса моделирования (синтезатора) сигналов и сценариев АС по ОБЗ, ЛА и БЖ.
7. Ранговая оптимизация вариантов экранных интерфейсных форм и комплексного алгоритма ИСППР, обеспечившая конкурентное преимущество более, чем на 50%.

Рис. 12 – Сравнительные свойства технологии СПРУ

Сам процесс оптимизации решения в условиях неформализуемых алгоритмов принятия решений сводится к выбору ЛПР с использованием АСППР лучшего варианта из всего множества возможных (альтернативных) вариантов с учетом данных обоснования и предложению ЛОР на основе максимизации функционала АПК ОМТИ, множества квазиоптимальных вариантов $J_{сорт,v}$, оценок конкурентной способности, перспективности развития ОМТИ по данному решению, накопленного ЛПР опыта, а также при необходимости и возможности мнения ЛИР.

Важнейшим преимуществом технологии СПРУ [17, 18] с ее развитием в ИСПРУ является минимизация влияния негативных факторов ситуационного управления, в первую очередь, «человеческого» (субъективных свойств операторов, ЛОР, ЛПР) и её инвариантность (неизменность архитектуры и алгоритмов, возможность адаптации в процессе эксплуатации) к специфике решаемых задач. В этой связи технология СПРУ может быть рекомендована для освоения и внедрения на других критических объектах и ситуационных центрах управления ими.

6. Реализация ПКМ при оптимизации объектов критической информационной инфраструктуры

В обеспечение безопасности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) в составе ОМТИ [18] в обеспечение Федерального закона от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» наряду с вопросами категорирования, взаимодействия с системой «ГосСОПКА», своевременным принятием мер реагирования каждый ОМТИ в составе автоматизированной системы в защищенном исполнении (АСЗИ) должен иметь собственную совершенную систему комплексной защиты информации (СКЗИ), прежде всего, объектов КИИ. Это позволит в рамках концепции распределённого управления обеспечить главные требования к качеству управления комплексной безопасностью (КБ, как меры обеспечения жизненно важных интересов ОМТИ от внутренних и внешних угроз субъективного и объективного характера) $Q_{КБ}$, включающие: оперативность управления O при ИКЗ z_0 ; достоверность используемых данных D, z_D ;

устойчивость U, z_U , скрытность S, z_S и непрерывность функционирования СКЗИ N, z_N и её экономичную ресурсоёмкость R, z_R .

Математическая модель оценки КБ с учетом данных табл. 1 [1] будет иметь частный вид

$$Q_{КБ} = C_{k,15}^A \{w_m, C_{m,5}^T [w_g, C_{g,7}^M (w_n, q_n)]\} \quad (5)$$

или непосредственно в функции показателей СКЗИ

$$Q_{КБ} = [(O^{z_0} \times D^{z_D} \times U^{z_U} \times S^{z_S} \times N^{z_N} \times R^{z_R}) \times (z_0 \times O + z_D \times D + z_U \times U + z_S \times S + z_N \times N + z_R \times R)]^{1/2}, \quad (6)$$

где 5 ГПК определяются при полимодельном оценивании по 15 моделям предпочтений (ИКЗ) с использованием не более 7 ЧПК, определяемых из соответствующих ГОСТ и технических регламентов.

Пример типовой структуры СКЗИ приведен на рис. 13 и включает комплекс организационно-технических мероприятий (КОТМ), систему менеджмента качества обеспечения безопасности информации (СМК-БИ) и 7 технических подсистем приведенного состава технических средств: 1.ПМУБ (мониторинга и управления), 2.ПРД (разграничения доступа), 3.ПАЗ (анализа защищенности), 4.ПЗВ (защиты от вторжений), 5.ПЗВК (защиты от вредоносных кодов), 6.ПКЗИ (криптографической защиты), 7.ПКЦ (контроля целостности данных).

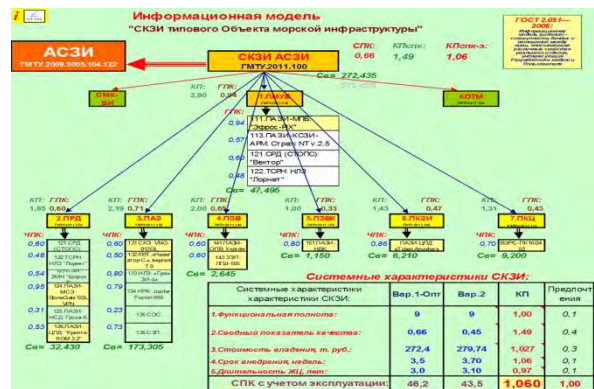


Рис. 13 – Структура СКЗИ объекта КИИ (вариант)

Приведенные системные показатели качества АСЗИ подтверждают целесообразность принятого проектного решения при конкурентном преимуществе в сравнении с базовым вариантом по АПК (СПК) порядка 6%, что весьма существенно.

Наличие системного показателя качества СКЗИ КИИ ОМТИ позволяет при использовании ПКМ обоснованно решать основную задачу исследователя обоснования её структуры, функциональных задач, свойств и характеристик на всех этапах жизненного цикла.

Опыт исследовательского проектирования разнородных ОМТИ показывает, что принципиально важным требованием в обеспечение заданных требований по качеству управления КИИ является наличие и непрерывное эффективное использование автоматизированных систем мониторинга за состоянием комплексной безопасности по системным показателям типа (6), а

также информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки принятия решений и управления СКЗИ по технологии типа ИСПРУ [18-21].

Непрерывный контроль уровня КБ ОМТИ позволит с учетом цикличности управления и обеспечения перспективности развития СКЗИ в перспективе перейти к роботизированному управлению КБ. Это позволит оперативно и качественно управлять локализацией информационных инцидентов, но, главное, исключить возможность проявления негативных субъективных свойств операторов (ЧФ), который сегодня является исключительно важным и требующим непрерывного контроля, нейтрализации.

Именно эти системные требования должны быть обеспечены соответствующим комплексом методических и организационно-распорядительных решений, а также аппаратно-программными средствами оценки, анализа и мониторинга достигаемого уровня системного качества и эффективности эксплуатации ОМТИ (рис. 10).

Другим важным системным аспектом управления КИИ ОМТИ следует считать более высокий уровень риска, ресурсных затрат и потенциального ущерба при принятии ошибочных системных управленческих решений, в том числе при определении направлений развития соответствующих технологий.

Системным аспектом циклического управления развитием критических ОМТИ, модель которого приведена на рис. 14 в развитие [1: рис. 2], является минимизация структурной, функциональной избыточности за счет многокритериальной и полимодельной системной оптимизации с использованием всего «арсенала» современных научных достижений.



Рис. 14 – Функциональная модель управления развитием КИИ ОМТИ

В современных условиях развития КИИ ОМТИ первостепенное внимание при наращивании их возможностей и качества следует уделять именно системным показателям качества типа (1)-(2) на основе количественного измерения, оценивания, системного анализа и вариантного синтеза функционирования СКЗИ ОМТИ в целом. Это позволяет адекватно оценивать ситуационную обстановку на объекте и принимать рациональные (безошибочные, эффективные, оптимальные)

управленческие решения, в том числе минимизировать влияние негативных субъективных свойств операторов.

7. Управление качеством объектов КИИ класса «Морские интегрированные системы управления в защищенном исполнении»

Наращивание структуры и функциональных возможностей современных АСЗИ, включая морские интегрированные системы управления в защищенном исполнении (МИСУВЗИ) приводит к ситуации неизбежного перехода к **парадигме роботизированного управления**, основными признаками которой могут быть названы:

- повышение уровня полноты автоматизации процессов управления до 95% и более;
- переход от функций принятия решений ЛПР для достижения назначенных целей и выполнения соответствующих задач к функции целеполагания (целераспределения) с соответствующим их достижением *на основе* применения робототехнических комплексов и систем (РТК);
- достижение высокого уровня качества управления (по АПК более 90%) *за счет* использования **когнитивных алгоритмов управления** (с добыванием новых знаний при обработке данных) и высокоэффективных КБДЗ с ранжированием ценности и полноты хранимых данных *за счет* сетцентрических систем информационного взаимодействия.

С учетом названных тенденций развития АСЗИ наметился переход к интегрированным системам управления, в том числе на ОМТИ [15].

В этой связи представленная на рис. 15 в соответствии с [14] система управления с позиций ПКМ может быть представлена моделью ИСБУ вида

$$Q_{ИСБУ} = C_{ИСБУ,7}^A \{w_m, C_{m,6}^M [w_g, C_{g,16}^I (w_n, q_n)]\}. \quad (7)$$

Запись АПК ИСБУ применительно к подводным лодкам (ПЛ) можно интерпретировать следующим образом: количественная оценка векторного критерия качества ИСБУ ПЛ представляет собой свертку показателей качества третьего порядка, включая:

$M = 7$ модельных показателей качества (МПК), например, для выбранных из множества моделей по числу решаемых ПЛ основных задач и уровням введенной готовности по алгоритму свертки аддитивного типа (А);

$G = 6$ групповых показателей качества, отражающих основные свойства ИСБУ в составе (Б);



Рис. 15 – Структура ОМТИ класса ИСБУ ПЛ

$N \geq 16$ частных показателей качества (вариант), отражающих отдельные свойства ИСБУ по всем подсистемам и для каждого из ГПК по алгоритму свертки гармонического типа (Г), обеспечивающему, как показано в [8, 10-12], минимальную методическую погрешность оценки АПК ИСБУ.

Представленная на основе реализации ПКМ модель ИСБУ в аналитическом виде размерностью

$$R_{ИСБУ} = 1 + M \times G \times N = 1 + 7 \times 6 \times 16 = 673 \quad (8)$$

позволяет в соответствии с представленной выше методологией перейти к цифровому моделированию и оптимизации их структуры, свойств и характеристик при наличии достоверных исходных данных по ЧПК, ИКЗ и ИСПРУ обеспечения процессов исследовательского проектирования.

Особое место в составе ИСБУ сегодня уделяется ИСПРУ в обеспечение информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки операторов. Причем, инвариантность ИСПРУ типа «СПРУ-ЛА» (рис. 9) к специфике ОМТИ, структуре разнородных систем управления позволяет их адаптировать (без изменения структуры и состава программно-аппаратных средств) к различным проектам судов (кораблей), других ОИП.

Для иллюстрации на рис. 16 приведен пример типовой структуры системы автоматизации промышленного предприятия, реализация ПКМ для которого может быть представлена в виде

$$Q_{CA} = C_{CA,15}^A \{w_m, C_{m,12}^T [w_g, C_{g,7}^T (w_n, q_n)]\}. \quad (9)$$



Рис. 16 – Место внедрения технологий ИСПРУ в структуре систем автоматизации (вариант)

В части влияния на деятельность управленческого персонала предприятий, ситуационных центров внедрение технологических и аппаратно-программных решений ИСПРУ позволяет создать более комфортную среду управления за счет фактического обеспечения информационно «прозрачной» (объективной) визуализации комплексной обстановки, по ее количественной оценке, анализу и контролю, оперативному (своевременному) реагированию на ее изменение.

В заключение перейдем к рассмотрению примера реализации ПКМ анализа, синтеза и оптимизации с учетом специфики ОИП, иллюстрирующего его

инвариантность к специфике условий и решаемых задач, универсальность использования ПКМ.

8. Инвариантность ПКМ к специфике условий использования и решаемых задач

Инвариантность ПКМ системной оптимизации ОИП рассмотрим на примере, не характерном для ОМТИ, но широко распространенном и хорошо известном для большинства читателей – для задачи ранжирования по агрегированному (интегральному) показателю качества ОИП типа «Легковой автомобиль» класса «Кроссовер».

СНИП "КСР-18.5" Оценка конкурентной способности (КС) и перспективности развития (ПР) легковых автомобилей и кроссоверов
Эксперт: Алехин А.В.

Назначение объектов сравнения (анализ):	Критерии и допустимые значения в агрегированных условиях:	КП:					
Основные конкурентные свойства 10 альтернативных вариантов, включая субоптимальный (№ 9), по отношению к базовому для сравнения варианту (№ 4)	1. Производственное качество (дефектность, трудоемкость, коррозия, перепад, технологичность)	112,1%					
	2. Технологичность эксплуатации (маневренность, экологичность обслуживания, безопасность)	100,0%					
	3. Качество строения кузова (ресурсы прочности, эргономичность)	102,7%					
	4. Экономичность владения (цена маркетинговая, цена фактовая, стоимость обслуживания)	97,3%					
Оценка КП9-4 и вариантной оптимизации объектов анализа (ОА): 0,60%							
Критерии оценки качества \ Объект сравнительного анализа (ОСА)	ИКС (вес)	1. Renault Captur 1.6 МКПП 114 FW D 2019 2WD	2. Renault Arkana 1500 4WD	3. Hyundai Tucson 2.0 АКПП 1500 4WD	4. Renault Captur 2.0 АКПП, Style, 2020	5. Renault Arkana Prima (B3P2M3) 2.0 5C	
Поставщик:							
	112,2	ПетроАВ	ПетроАВ	Соларис	ПетроАВ	Соларис	
ГПК:	1. Энергоэффективность, %	15	105,1	95,7	96,6	100,0	100,0
ЧПК:	1.1. Мощность двигателя, л.с.	15	150	114	150	143	150
	1.2. Смешанный расход топлива, л/100 км	-50	7,3	7,4	8,3	8	7,2
	1.3. Скорость максимальная, км/ч	10	195	171	180	185	191
	1.4. Приемистость, л.	-20	11,1	12,5	11,8	10,5	10,5
	1.5. Токсичность, CO2, г/км	-5	165	171	165	171	165
	2. Объем багажника, %	5	109,6	109,3	156,1	100,0	130,4
	2.1. Минимальный, л	95	425	425	615	387	508
	2.2. Максимальный, л	0	600	600	1665	1200	1200
	2.3. Объем авто в целом, м3	5	13,40	12,67	13,72	12,67	14,6
	3. Трансмиссия, %	10	71,0	71,0	100,0	100,0	71,0
	3.1. Коробка передач: Ручн.-1, АКПП-2, АКПП-3, робот-4	70	2	2	3	3	2
	3.2. Привод: передн.-1, полный -2	10	1	1	2	2	1
	3.3. Тормоза: барабан -1, диски -2	20	2	2	2	2	2
	4. Техническая экономичность, %	15	108,6	107,2	95,8	100,0	110,1
	4.1. Расход топлива в городе, л/100 км	-47	9,2	9,3	11,2	10,1	9,1
	4.2. Расход топлива на трассе, л/100 км	-50	6,2	6,3	6,7	6,7	6,1
	4.3. Число передач, ед.	3	6	6	7	6	6
	5. Сервисная прочность, %	10	96,4	100,0	96,2	100,0	100,8
	5.1. Эксплуатационная надежность, %	40	90	90	90	90	90
	5.2. Сервисная доступность (массовость), %	20	90	90	90	90	90
	5.3. Клиренс, мм	40	183	201	182	201	205
	6. Комплектация, %	5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	6.1. Зимняя резина, задвижка фильтра, другое	80	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	6.2. Имя модели, фирмы, %	20	95	95	95	95	95
	7. Технологичность обслуживания, ус.ед.	5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	7.1. Сложность эксплуатации, ус.ед.	-60	95	95	95	95	95
	7.2. СамоРемонтонпригодность, ус.ед.	30	30	30	30	30	30
	7.3. Ресурсоёмкость обслуживания, тыс.руб.	-10	30	30	30	30	30
	8. Безопасность эксплуатации, %	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	8.1. Безрисковость эксплуатации, %	-40	80	80	80	80	80
	8.2. Число подушек безопасности, шт.	60	2	2	2	2	2
	9. Экономичность владения, %	20	86,9	107,4	97,3	100,0	97,3
	9.1. Цена (маркетинговая)	0	950	101800	871,5	963	963
	9.2. Цена (реальная), т.Р	-80	1500	1150	1300	1257	1300
	9.3. Стоимость эксплуатации, т.руб/месц.	-20	10	10	10	10	10
	10. Эстетизм, имидж и другие, %	5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,6
	10.1. Эргономичность, %	40	90	90	90	90	90
	10.2. Дизайн, класс комфорта, %	30	90	90	90	90	100
	10.3. Имя модели и др. пок-п качества, %	30	90	90	90	90	100
	Конкурентная способность (КС), ед.		96,3	99,3	100,4	100,0	100,6
	Ранжирование вариантов по уровню КС, Ранг		5	4	2	3	1
	Конкретное превосходство к варианту 4, КП, %		2,1	-0,69	0,44	0,00	0,60
	Перспективность развития (ПР) варианта 9 к 2 (ранг Renault), %		0,0				1,29

Рис. 17 – Результаты вариантной оптимизации ОИП типа «Автомобиль» класса «Кроссовер»

С этой целью на рис. 17 представлены результаты вариантной оптимизации выбора лучшей из 12 альтернатив кроссоверов, лидером из которых был определен вариант «9. Renault Arkana Prima (B3P2M3 TX 5C)» с учетом принятых значений индексов критериальной значимости (отношений предпочтений) при конкурентном превосходстве 0,6% по отношению к варианту «4. Renault Captur, 2.0, АКПП4, Style, 2020».

При этом следует заметить, что для такой высокотехнологичной отрасли ОИП как автопром, конкурентная способность альтернативных вариантов лежит в достаточно узком диапазоне значений 96,3...100,6.

Это, с одной стороны, подтверждает высокий и сопоставимый уровень качества автомобилей

мировых брендов на рынке и острую конкурентную борьбу производителей за рынки сбыта, а, с другой стороны, обостряет известную проблему выбора предпочтительного варианта, безусловно, с учетом и контролем погрешностей используемых исходных данных. Причем, для каждого из покупателей - с учетом разнообразия их предпочтений.

Более того, это обостряет также проблему выбора методического аппарата вариантного анализа и оптимизации ОИП, чему далеко не часто уделяется должное внимание и, особенно, при использовании маркетинговых/рекламных данных. Равно, как при проведении конкурсных закупок, а также сертификации соответствия, например, в сравнении с сертификацией качества [19-21].

Тем самым, приведенные только отдельные примеры реализации ПКМ инвариантной оценки, анализа, синтеза и оптимизации разнородных объектов исследовательского проектирования подтверждают его уникальные возможности, практическую значимость и перспективность.

Заключение

Стремительный рост сложности современных объектов морской техники и морской инфраструктуры, ужесточение требований к качеству процессов их создания и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла обуславливают особую необходимость поиска инвариантных к специфике решаемых задач, условий эксплуатации технических и технологических решений, а также моделей их оценки, анализа, синтеза, оптимизации, исследовательского проектирования и обоснования их свойств и характеристик, включая анализ конкурентной способности, перспективности и путей их технологического развития.

В результате проведения ряда поисковых и прикладных исследований обоснована

целесообразность, возможность, разработаны модель, методика и приведен ряд разнородных примеров реализации названного Полиметрическим методом инвариантной оценки, анализа и оптимизации проектного качества (при разработке) и эффективности (при эксплуатации) современных структурно сложных систем, а также мониторинга, прогнозирования и управления качеством при эксплуатации.

Рассмотрены конкретные примеры реализации разработанного метода применительно к объектам морской техники классов ледокол, большой противолодочный корабль, атомная многоцелевая подводная лодка, соединение кораблей охраны водного района, двигатель внутреннего сгорания, судовая энергетическая установка, система управления оружием и техническими средствами, электроэнергетическая система, морская интегрированная система управления в защищенном исполнении, автоматизированная система поддержки принятия решений операторами.

Приведенные примеры реализации метода подтвердили высокую исследовательскую результативность и перспективность развития предложенной технологии и реализации Полиметрического квалитетного метода инвариантной оценки, анализа, синтеза и системной оптимизации объектов исследовательского проектирования.

Инвариантность разработанного метода к решаемым задачам и условиям функционирования позволяют рекомендовать его к широкому применению при исследовательском, техническом и технологическом проектировании, а также при оценке и мониторинге эффективности разнородных организационно-технических объектов, но, прежде всего, объектов критической инфраструктуры.

Благодарности

Автор выражает благодарность своим коллегам профессору Хруцкому О.В. и профессору Равину А.А., принявшим участие в обсуждении статьи и давших автору целый ряд ценных рекомендаций.

Литература

1. Алексеев А.В. Модель инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники // Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 2 том 2, 2020, с. 53-60 / № 2 part 2, 2020, pp. 53-60.
2. Алексеев А.В. Методика инвариантной оценки качества и эффективности объектов морской техники и морской инфраструктуры / Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 1 том 2, 2021, с. 60-67 / № 1 part 2, 2021, pp. 60-67.
3. Алексеев А.В., Кузнецов В.В., Согонов С.А., Равин А.А., Хруцкий О.В. Морская энергетика на рубеже цифровизации и интеллектуализации системного управления / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы девятой международной научно-технической конференции в рамках Пятого Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2021.02.16. С. 363 – 369.
4. Прудниченко П.С., Алексеев А.В. Система поддержки принятия решений, мониторинга и управления обеспечением безопасной эксплуатации кораблей охраны водного района / Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2020)». Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020 г.: Материалы конференции. СПОИСУ. – СПб, 2020, с. 187-189.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 19176-85 «Системы управления техническими средствами корабля. Термины и определения». Переиздание: июнь 1999 г.
6. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980.
7. Захаров И.Г. Теория принятия компромиссных решений при исследовательском проектировании кораблей – Л.: 1 ЦНИИ МО, 2004.

8. Алексеев А.В. О регуляризации задачи многокритериальной оптимизации при исследовательском проектировании морских радиоэлектронных комплексов и систем / Тез. докл. Объединенного академического научно-технического семинара, 16.12.98. - СПб: ВМА, с. 38-41.
9. Алексеев А.В. Оперативная оценка конкурентной способности в условиях национального и мирового рынка объектов морской техники / Актуальные проблемы морской энергетики: Материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции, 18-19 февраля 2016 г. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. С. 20-23.
10. Алексеев А.В. Численное моделирование процессов стратегического развития объектов морской техники и инфраструктуры / Корабельная энергетика: из прошлого в будущее: материалы Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. С. 329–334.
11. Алексеев А.В., Карпов А.Е., Каганский М.А. Модель и технология мониторинга военно-технического превосходства в морской операции / Интеллектуальные проблемы разработки в интересах строительства и развития ВМФ: Тр. НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Науч.-техн. сб. статей и докладов НТК 6.12.2018 г. – Петродворец, 2019. – Ч. 1. – С. 15–25.
12. Алексеев А.В., Тычинин И.Ю., Худобородов Е.Ф. Теория практики системного обоснования требований и путей обеспечения военно-технического превосходства ВМФ / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы восьмой международной НТК в рамках Третьего Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2019, с.251–357.
13. Субетто А.И. Сочинения. Изосферизм: В 13 томах. Том девятый: Синтетическая квалиметрия. Книга 1 / Под ред. Л.А. Зеленова. – С.-Петербург – Кострома: КГУ им. Н.А. Некрасова, 2011. – 620 с.
14. Шилов К.Ю. Технические и технологические направления развития цифровых систем морской радиоэлектроники / Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. / ОАО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2015. Вып.31, с. 7-18.
15. Гайкович А.И. Оптимизация корабля, использующая предпочтения проектанта / Морские интеллектуальные технологии / Marine intellectual technologies, № 1 том 2, 2021, с. 68-74 / № 1 part 2, 2021, pp. 68-74.
16. Алексеев А.В., Поляничко В.В. Оценка качества и конкурентной способности систем поддержки принятия решений корабля, судна / Материалы XVII Международной научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении – 2016», 16.06.2016. – СПб.: СЗ «Северная верфь», ИЦ «MARINCONF» 2016, с. 71 – 76.
17. Алексеев А.В., Смольников А.В., Сус Г.Н., Ушакова Н.П. Когнитивные технологии системы поддержки принятия решений и управления борьбой за живучесть корабля, судна / Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2019. Вып. 3, с. 18-27.
18. Алексеев А.В. Концептуальные аспекты управления развитием критических объектов морской техники и морской инфраструктуры / Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал, № 2 (28) Т.1, 2015, с. 47 – 57.
19. Бобрович В.Ю., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В., Кузнецов В.В., Тычинин И.Ю. Конкурентная способность как главный фактор инвестиционной привлекательности / IV Санкт-Петербургский международный экономический конгресс (СПЭК-2018): материалы. – СПб.: НИИР им. С.Ю. Витте, 2018.04.2. С. 46–51.
20. Алексеев А.В., Кузнецов В.В., Равин А.А., Согонов С.А., Хруцкий О.В. Оптимизация системного управления ОМТИ: теория практики / Труды СПбГМТУ, выпуск 5 (Труды ЛКИ. Выпуск 268), 2018. С. 65–69.
21. Инвариантный анализ, синтез и оптимизация качества структурно сложных систем ситуационного управления / Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VI межрегиональной научно-практической конф. Севастополь / Севастопольский государственный университет; науч.ред. Б.В.Соколов. – Севастополь: СевГУ, 2020, с. 105-106.

References

1. Alekseev A.V. Model of invariant assessment of the quality and efficiency of marine engineering objects // Marine intellectual technologies, No. 2 volume 2, 2020, pp. 53-60 / No. 2 part 2, 2020, pp. 53-60.
2. Alekseev A.V. Methodology for invariant assessment of the quality and efficiency of marine engineering and marine infrastructure facilities / Marine intellectual technologies, No. 1 volume 2, 2021, pp. 60-67 / No. 1 part 2, 2021, pp. 60-67.
3. Alekseev A.V., Kuznetsov V. V., Sogonov S. A., Ravin A. A., Khrutsky O. V. Marine power engineering at the turn of digitalization and intellectualization of system management / Actual problems of marine power engineering: materials of the ninth international scientific and technical conference within the framework of the Fifth All-Russian Scientific and Technical Forum "Ship power engineering: from the past to the future". - St. Petersburg: Publishing house of SPbGMTU, 2021.02.16. p. 363-369.
4. Prudnichenko P. S., Alekseev A.V. System of decision-making support, monitoring and management of ensuring safe operation of water area protection ships / Regional Informatics (RI-2020). XVII St. Petersburg International Conference " Regional Informatics (RI-2020)". St. Petersburg, October 28-30, 2020: Conference Proceedings. SPOIS. - SPb, 2020, p. 187-189.
5. Interstate standard GOST 19176-85 " Control systems of technical means of the ship. Terms and definitions". Reissue: June 1999
6. L. Y. Khudyakov Research design of ships. – L.: Shipbuilding, 1980.
7. Zakharov I. G. the Theory of adoption compromise solutions in the research design of the ships – L: 1 TSNII MO, 2004.

8. Alekseev, A. V. On the regularization of multi-objective optimization task in the research design of marine electronic systems and systems / proc. Dokl. United Academic Scientific and Technical Seminar, 16.12.98. - St. Petersburg: VMA, p. 38-41.
9. Alekseev A.V. rapid assessment of competitiveness in the domestic and global market of marine objects / Actual problems of marine energy: materials of the fifth all-Russian interdisciplinary scientific-technical conference, February 18-19, 2016 – SPb.: IZD-VO SPBGMTU, 2016. Pp. 20-23.
10. Alekseev, A. V., Numerical simulation of the processes of strategic development of marine facilities and infrastructure / Ship power engineering: from the past to the future: materials of the All-Russian Intersectoral Scientific and Technical Forum. - St. Petersburg: SPbGMTU Publishing House, 2017. pp. 329-334.
11. Alekseev A.V., Karpov A. E., Kagansky M. A. Model and technology of monitoring of military-technical superiority in the naval operation / Intellectual developments in the interests of construction and development of the NAVY: Tr. Research Institute of OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy". Scientific and technical collection of articles and reports of the STC 6.12.2018-Petrodvorets, 2019. - Part 1. - p. 15-25.
12. Alekseev A.V., Tychinin I. Yu., Khudoborodov E. F. Theory of practice of system justification of requirements and ways of ensuring military-technical superiority of the NAVY / Actual problems of marine energy: materials of the Eighth International Scientific and Technical Conference within the framework of the Third All-Russian Scientific and Technical Forum "Ship power engineering: from the past to the future". - St. Petersburg: Publishing House of SPbGMTU, 2019, p. 251-357.
13. Subetto A. I. Essays. Noospherism: In 13 volumes. Volume nine: Synthetic qualimetry. Book 1 / Edited by L. A. Zelenov – - St. Petersburg – Kostroma: KSU named after N. A. Nekrasov, 2011 – - 620 p.
14. Shilov K. Yu. Technical and technological directions of development of digital systems of marine radioelectronics / Control and information processing systems: scientific and technical collection / JSC "Concern "NPO "Aurora". Saint Petersburg, 2015. Issue 31, p. 7-18.
15. Gaikovich A. I. Optimization of the ship using the preferences of the designer / Marine intellectual technologies, No. 1 volume 2, 2021, pp. 68-74 / No. 1 part 2, 2021, pp. 68-74.
16. Alekseev A.V., Polyanchko V. V. Evaluation of the quality and competitive ability of decision support systems of a ship, a ship / Materials of the XVII International scientific and Practical conference MORINTECH-PRAKTIK "Information Technologies in shipbuilding-2016", 16.06.2016. - St. Petersburg: SZ "Severnaya ver", CI "MARINCONF" 2016, pp. 71-76.
17. Alekseev A.V., Smolnikov A.V., Sus G. N., Ushakova N. P. Cognitive technologies of the decision support system and management of the struggle for the survivability of the ship, ship / Information management and processing systems: scientific and technical collection / JSC "Concern "NPO "Aurora". St. Petersburg, 2019. Issue 3, p.18-27.
18. Alekseev A.V. Conceptual aspects of management of the development of critical objects of marine technology and marine infrastructure / Marine intelligent technologies. Scientific Journal, No. 2 (28) Vol. 1, 2015, pp. 47-57.
19. Bobrovich V. Yu., Alekseev A.V., Antipov V. V., Smolnikov A.V., Kuznetsov V. V., Tychinin I. Yu. Competitive ability as the main factor of investment attractiveness / IV St. Petersburg International Economic Congress (SPEC-2018): materials. - St. Petersburg: S. Yu. Witte Research Institute, 2018.04.2. pp. 46-51.
20. Alekseev A.V., Kuznetsov V. V., Ravin A. A., Sogonov S. A., Khrutsky O. V. Optimization of OMTI system management: theory of practice / Trudy SPbGMTU, issue 5 (Trudy LKI. Issue 268), 2018. pp. 65-69.
21. Invariant analysis, synthesis and optimization of the quality of structurally complex systems of situational management / Perspective directions of development of domestic information technologies: materials of the VI interregional scientific and practical conference. Sevastopol / Sevastopol State University; scientific ed. by B. V. Sokolov. - Sevastopol: SevSU, 2020, pp. 105-106.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Владимирович Алексеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматизации и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: iapbgks@bk.ru

Anatoly V. Alekseev, 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: iapbgks@bk.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 629.12

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.037>

Исследование математической модели проектирования барже-буксирного комплекса для Республики Союза Мьянма

Т.А. Апалько¹, e-mail: apalko71@mail.ru, Най Мьо Хлаинг¹, e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье описана математическая модель проектирования барже-буксирного комплекса с учётом особенности эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма. В статье исследуются особенности ББК как объекта оптимизации, описана математическая модель ББК, отображается его как сложную техническую систему. В рамках модели приведены математические зависимости и алгоритмы для определения элементов теоретического чертежа, мощности главных двигателей, для решения некоторых вопросов общего расположения с учетом расстояния главных водонепроницаемых переборок корпуса, для расчета нагрузки и устойчивости. Метод комплексной оценки эффективности применения барже-буксирного комплекса на стадии технико-экономического обоснования проекта в условиях развивающихся стран, в частности в условиях Республики Союз Мьянмы. В результате работы были полностью определены параметры основных типов барже-буксировочных комплексов для перспективной системы внутреннего водного транспорта Республики Союза Мьянма. На базе методов случайного поиска создан алгоритм оптимизации элементов ББК, решающий задачу математического программирования с процедурным характером функции критерия и функциональных ограничений. Математическая модель и алгоритм оптимизации реализованы в виде программы для обеспечения компьютерного эксперимента. Программа, реализующая математическую модель проектирования ББК, состоит из отдельных программных модулей, что облегчает ее совершенствование в анализе результатов решения задачи. Создан программный комплекс с использованием языка программирования Паскаль в среде Delphi для обеспечения автоматизирования проектирования. Указанные программы могут быть использованы в исследовательском проектировании на начальных стадиях проектирования.

Ключевые слова: проектирование, оптимизации, исследование, теоретический чертеж, эксперимент, программа, мощность, главный двигатель, общее расположение, математическая модель.

Research of a mathematical model for designing a barge-towing complex for the Republic of the Union of Myanmar

Tatyana A. Apalko¹, e-mail: apalko71@mail.ru, Nay Myo Hlaing¹, e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article describes a mathematical models for designing a barge-towing complex, taking into account the peculiarities of operation in the conditions of the Republic of the Union of Myanmar. The article examines the features of the BBK as an object of optimization, describes the mathematical model of the BBK, displays it as a complex technical system. Within the framework of the model, mathematical dependencies and algorithms are given for determining the elements of the theoretical drawing, the power of the main engines, for solving some issues of the general location, taking into account the distance of the main watertight bulkheads of the hull, for calculating the load and stability. The method of comprehensive assessment of the effectiveness of the use of the barge-tow complex at the stage of the feasibility study of the project in the conditions of developing countries, in particular in the conditions of the Republic of the Union of Myanmar. As a result of the work, the parameters of the main types of barge-towing complexes for the prospective inland water transport system of the Republic of the Union of Myanmar were fully determined. On the basis of random search methods, an algorithm for optimizing the BBK elements is created, which solves the problem of mathematical programming with the procedural nature of the criterion function and functional constraints. The mathematical model and the optimization algorithm are implemented as a program to provide a computer experiment. The program that implements the mathematical model of the design of the BBK consists of separate program modules, which facilitates its improvement in the analysis of the results of solving the problem. A software package was created using the Pascal programming language in the Delphi environment to provide design automation. These programs can be used in research design at the initial stages of design.

Key words: design, optimization, research, experiment, theoretical drawing, program, power, main engine, general location, mathematical model.

Введение

Республика Союз Мьянма становится развивающейся страной, требующей соответствующей инфраструктуры, в том числе связанной с перевозками водным транспортом.

С учетом особенностей климата Республики Союза Мьянмы, единственным транспортом остаётся водный, который может круглогодично обработать грузы. С тех пор, пока Республики Союза Мьянма стала членом ассоциации АСЕАН, международная торговля постоянно развивается,

особенно, посредством морского транспорта. В связи с развитием внешней торговли, внутренней водной пути являются наиболее важным бизнесом для Республики Союза Мьянма.

Согласно статистическим данным Центральной статистической организации (ЦСО), внешней торговли увеличивается ежегодно в течение последнего десятилетия. На рисунке 1 показаны тенденции роста экспорта, импорта и общий объем торговли за период с 2010 до 2019 г.



Рис. 1. Тенденции экспорта, импорта, и общая стоимость торговли

Для Республики Союза Мьянма наиболее простым способом обеспечить увеличивающийся грузопоток является использование барже-буксирного комплексов (ББК) в наиболее простом варианте. Это буксировка одинарной баржи за буксиром. Кроме этого, такой состав комплекса удовлетворяет требованию судового хода в верховьях реки Иравади.

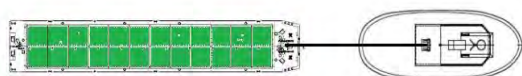


Рис. 2. Схема барже-буксирного комплексов для Республики Союза Мьянма

Математическим выражением задачи проектирования ББК является задача математического программирования или задача оптимизации.

1. Построение математической модели проектирования барже-буксирного комплекса (ББК).

Задача оптимизации основных характеристик барже-буксирного комплекса сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & C(c_1, \dots, c_p); \\
 & X(x_1, \dots, x_n); \\
 & (x_i) \min x_i (x_i) \max, \quad i=1, \dots, n; \\
 & G_j(X, C) \leq A_j(C), \quad j=1, \dots, m; \\
 & G_j(X, C) = A_j(C), \quad j=m, \dots, M; \\
 & \text{extr } Z(X, C),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где C – вектор технического задания, элементы которого представляют собой количественные и качественные требования к задаче; X – вектор оптимизируемых переменных (синтезируемых компонентов) задачи, содержащий n - непрерывных компонентов. Требования к качеству проектируемого ББК формулируются в виде совокупности равенств, неравенств и логических условий. Характеристики синтезируемой задачи описывается функциям G_j , а требования к характеристикам – соответственно, функциям A_j .

Для глобальной оценки соответствия качеств синтезируемой задачи целям ее создания применяется критерий эффективности (функция цели) Z , монотонно связанный с такой оценкой. Наилучшей считается задача, для которой критерий достигает экстремального значения (минимума или максимума в зависимости от физической природы критерия).

Оптимизируемыми параметрами ББК является:

- Коэффициент общей полноты баржи $0,72 \leq \delta_{бар} \leq 0,96$;
 - Длина баржи ($24,99 \leq L_{бар} \leq 91,6$) м;
 - Ширина баржи ($6 \leq B_{бар} \leq 17$) м;
 - Осадка баржи ($0,9 \leq T_{бар} \leq 2$) м;
 - Высота борта баржи ($2,1 \leq H_{бар} \leq 3,5$) м;
 - Коэффициент общей полноты буксир $0,45 \leq \delta_{бук} \leq 0,58$;
 - Длина буксира ($12 \leq L_{бук} \leq 25,01$) м;
 - Ширина буксира ($4,2 \leq B_{бук} \leq 8$) м;
 - Осадка буксира ($1,2 \leq T_{бук} \leq 2$) м;
 - Высота борта буксира ($2,1 \leq H_{бук} \leq 2,99$) м.
- Ограничения оптимизации нарушений задаются по следующим параметрам:

— Грузоподъемность баржи, $G_{гр} > G_{гр}^*$; (2)

— Уравнение нагрузки буксира, $D = \sum G_j$; (3)

— Остойчивость буксира, $K \geq 1$; (4)

— Вместимость буксира, $W_{расчет} \geq W_{требуем}$; (5)

— Критерий эффективности комплекса, $Z = \min (K * 0,12 + \Delta)$. (6)

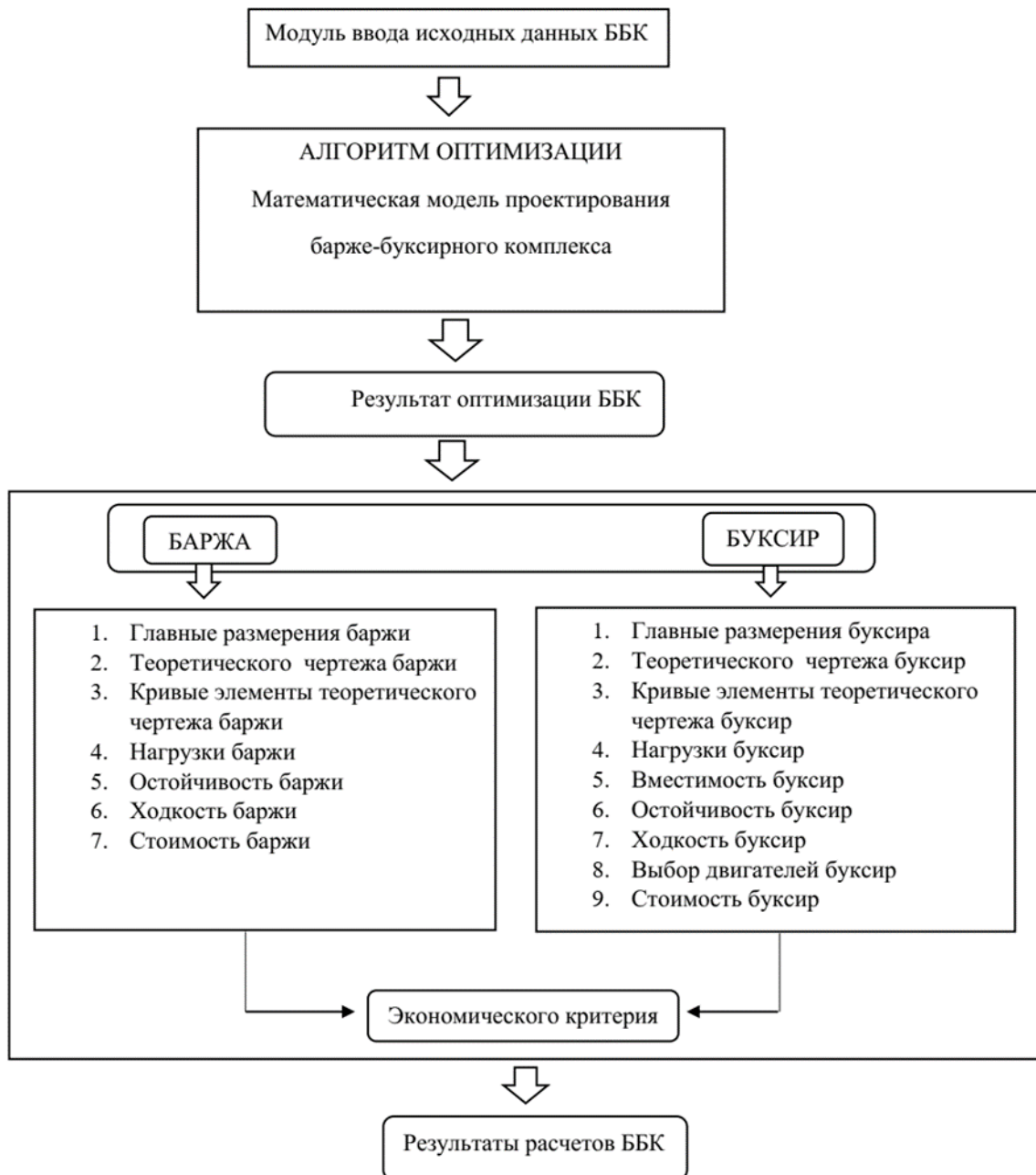


Рис.3. Архитектура программного комплекса

Состав расчетов математической модели ББК показан на рис.3.

Указанные зависимости (2),(3),(4),(5) и (6) образуют математическую модель проектирования ББК. Это модель реализована в виде программного комплекса, архитектура которого показана на рис. 4.

В качестве алгоритма оптимизации задачи выбран случайный поиск с адаптацией интерфейса модуля оптимизации, который показан на рис. 5.



Рис.4. Схема структуры имитационного программно-методического модуля ББК

АЛГОРИТМ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

ОПТИМИЗИРУЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ				РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ			
	MIN	НАЧАЛЬНОЕ	MAX				
Коэффициент общей полноты баржи	0,72	0,84	0,96	Коэффициент общей полноты баржи	0,84	Коэффициент общей полноты буксир	0,45
Длина баржи, м	24	57,5	91	Длина баржи, м	49,6	Длина буксира, м	18,5
Ширина баржи, м	6	11,5	17	Ширина баржи, м	12,4	Ширина буксира, м	6,1
Осадка баржи, м	0,9	1,45	2	Осадка баржи, м	1,3	Осадка буксира, м	1,6
Высота борта баржи, м	2,1	2,8	3,5	Высота борта баржи, м	2,8	Высота борта буксира, м	2,5
Коэффициент общей полноты буксир	0,45	0,45	0,58				
Длина буксира, м	12	18,5	25	Критерий эффективности	203		
Ширина буксира, м	4,2	6,1	8	№ лучшего цикла	11000		
Осадка буксира, м	1,3	1,65	2				
Высота борта буксира, м	2,1	2,5	2,99				

СТАТИСТИКА НАРУШЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Исходная информация к алгоритму		Нагрузки баржи	2017	Вместимость буксир4	10963
Число ограничений неравенств	9	Нагрузки буксир	3848	Вместимость буксир5	0
Число непрерывных переменных	10	Остойчивость буксир	0	Вместимость буксир6	0
		Вместимость буксир1	0		
		Вместимость буксир2	1		
		Вместимость буксир3	0	Всего циклов оптимизации	11000

Успех алгоритма случайного поиска

Рис.5. Информационный модуль оптимизации ББК

2. Исследование математической модели проектирования барже-буксирного комплекса (ББК).

Результаты, получаемые решением оптимизационной задачи, имеют практическое значение только в том случае, если математические

модели объектов проектирования являются адекватными [3].

В научной и инженерной практике мерой адекватности выступает точность, характеризующая сходство между информацией, получаемой математической модели от реальной системы.

Таблица 1.

Результаты оценки адекватности математической модели буксиры

Тип	Dт		Lм		Bм		Hм		Tм		б		Nдс		Z	
	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет
11139	165	147	24,4	22,5	7,78	7,5	2,8	2,4	1,8	1,89	0,46	0,46	296	294	216	200
14162	163	130	22	24,3	7,7	7,0	2,7	2,3	2,0	1,5	0,5	0,52	301	289	129	122
ALS10	148	125	21,89	22,2	6,23	5,8	2,82	2,67	2,0	1,75	0,53	0,52	323	318	363	311

D – полное водоизмещение, L – длина по КВЛ, B – ширина, T – осадка, H – высота борта, б – коэффициент обшей полноты,
N – мощность главных двигателей, Z – критерий эффективности

Исследование чувствительности модели. Исследование модели проектирования барже-буксирного комплекса в компьютерном эксперименте позволяет оценить влияние величины критерия эффективности в функции грузоподъемности ББК при изменении ограничений задачи синтеза и компонентов ее решения. (Рис. 7.)

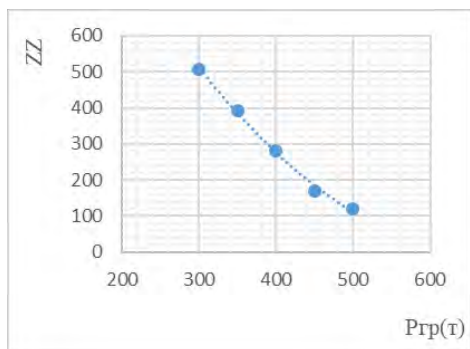


Рис. 6. Зависимость эффективности от грузоподъемности баржи

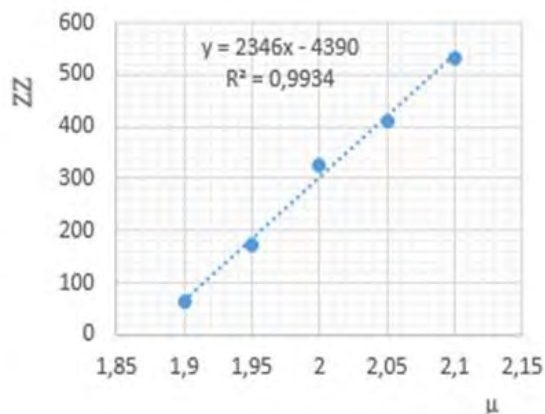
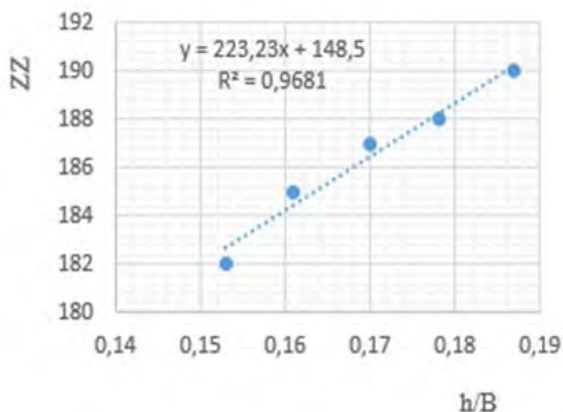


Рис. 7. Пример исследования устойчивости математической модели проектирования

На основании аппроксимация графиков, показанных на рис. 8, получены зависимости для критерия эффективности от оптимизируемых переменных:

$$ZZ = 2346 \mu - 4390 \quad (8)$$

$$ZZ = 223 (h/B) + 148 \quad (9)$$

Заключение

Полученная математическая модель проектирования ББК с учётом особенности

По поводу анализа сравнения результатов, можно допускать, что проектные характеристики буксирного судна, полученного решением оптимизационной задачи по прикладной программе, близки к характеристикам реального судна. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель буксирного судна при оптимизации имеет достаточно высокую степень адекватности.

Из содержания таблицы 1 можно сделать вывод, что разработанная математическая модель имеет необходимую степень адекватности для использования на начальных стадиях проектирования.

эксплуатации в условиях Республики Союз Мьянма даёт реальную возможность использования такого метода при проектировании необходимого ББК. Данный расчет может быть использован в математических моделях оптимизации основных кораблестроительных характеристик на начальных стадиях.

Литература

1. Алчуджан Г. А. Исследование динамической устойчивости буксирного судна на волнении с учетом нелинейности возмущающих сил. Материалы по обмену опытом НТО Судпрома << Мореходность и управляемость судов >>, 1968, вып. 105.
2. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. – СПб.: НИЦ << МОРИНТЕХ >>, 2001, – 432С.
3. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Том 2, 2014, 872 с.
4. Богданов Б.В., Слуцкий А.В., Шмаков М.Г., Васильев К.А., Соркин Д.Х. Буксирные суда. – Л., Изд. «Судостроение», 1974, 280 с.
5. Шмаков М.Г. Буксирные устройства судов (проектирование и расчет). – Л.: Судостроение, 1966. - 260 с.
6. Шанчуров П.Н., Соларев Н.Ф., Щепетов И.А. Управление судами и составами. М.: Транспорт, 1971. - 544 с.
7. БУКСИРОВКА И ТОЛКАНИЕ СОСТАВОВ (продолжение): <http://rulewoy.ru/statya/BUKSIROVKA-I-TOLKANIE-SOSTAVOVprodolzhenie.php>

References

1. Ichudzhan G. A. Investigation of the dynamic stability of a tugboat on a wave, taking into account the nonlinearity of disturbing forces. Materials on the exchange of experience of NTO Sudprom << Seaworthiness and controllability of ships >>, 1968, issue 105.
2. Gaikovich A. I. Fundamentals of the theory of designing complex technical systems. - ST. PETERSBURG: SIC << MORINTECH >>, 2001, – 432C.
3. Gaikovich A. I. design Theory of displacement ships and vessels. Volume 2, 2014, 872 p.
4. Bogdanov B.V., Slutsky A.V., Shmakov M.G., Vasilyev K.A., Sorkin D.Kh. Tugboats. - L., Ed. Shipbuilding, 1974, 280 p.
5. Shmakov M. G. towbar vessels (design and calculation). – L.: Shipbuilding, 1966. - 260 p.
6. Shanchurov P. N., Solarev N. F., Shchepetov I. A. Management of ships and trains. Moscow: Transport, 1971. - 544 p.
7. TOWING AND PUSHING OF TRAINS (continued)): <http://rulewoy.ru/statya/BUKSIROVKA-I-TOLKANIE-SOSTAVOVprodolzhenie.php>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Татьяна Анатольевна Апалько, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: apalko71@mail.ru

Tatyana A. Apalko, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of ship design, St.Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: apalko71@mail.ru

Най Мьо Хлаинг, аспирант кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com

Nay Myo Hlaing, graduate student of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.825 (0131)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.038>

Методика экспериментальной оценки коэффициента эффективности вибрационной защиты канатнодержневой муфты «MAMSAR+A» дизель- генераторного агрегата ДГА-8,83

М.А. Минасян¹ e-mail: mamsar@mail.ru, А.М. Минасян¹ e-mail: mamsar@mail.ru,
Ц. Цзэн¹ e-mail: tzeng817@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Объектом исследования является опытный образец запатентованной канатнодержневой муфты (КСМ) «MAMSAR+A» в качестве привода дизель-генераторного агрегата ДГА-8,83 мощностью 9,56 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹ с дизелем 2Ч 8,5/11 и генератором «ГК-5,6».

Целью исследования является экспериментальная оценка коэффициента эффективности вибрационной защиты КСМ.

Поставленная цель достигается разработкой и реализацией оригинальной методики экспериментальной оценки коэффициента эффективности КСМ с анализом и выводами результатов экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводятся в два этапа. Первый этап – с упругим соединением КСМ, второй этап – с жестким соединением.

Оригинальность методики экспериментальной оценки коэффициента эффективности вибрационной защиты КСМ главным образом заключается в том, что между двумя этапами экспериментальных исследований КСМ не демонтируется. Следовательно, качество центровки не нарушается.

Усредненный коэффициент эффективности виброизоляции КСМ составляет от 3 до 8 дБ.

Ключевые слова: канатнодержневая муфта, эффективность виброизолирующей канатной муфты, методика оценки эффективности виброизоляции муфты.

Method of experimental evaluation of the efficiency coefficient of vibration protection of the rope-rod coupling "MAMSAR+A" of the diesel generator set DGA-8.83

Minas A. Minasyan¹ e-mail: mamsar@mail.ru, Armen M. Minasyan¹ e-mail: mamsar@mail.ru,
Junjie Zeng¹ e-mail: tzeng817@gmail.com

¹St. Petersburg State marine technical university Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract The object of this research is a prototype of the patented wire rope coupling (KSM) "MAMSAR+A" as a drive for a diesel-generator unit DGA-8.83 with a power of 9.56 kW at a speed of 1500 min⁻¹ with a 2CH 8.5/11 diesel engine and a generator "KG-5.6".

The aim of the research is to experimentally evaluate the efficiency coefficient of vibration protection of the KSM.

This goal is achieved by developing and implementing an original method for experimental evaluation the efficiency coefficient of the KSM with analysis and conclusions of the results of experimental studies.

Experimental studies are conducted in two stages. The first stage - with an elastic connection of the coupling, the second stage - with a rigid connection.

The originality of the method of experimental evaluation of the efficiency coefficient of vibration protection of the KSM mainly lies in the fact that the KSM is not dismantled between the two stages of experimental research. Therefore, the quality of alignment is not violated.

The average coefficient of vibration isolation efficiency of the KSM is from 3 to 8 dB.

Key words: wire rope coupling, efficiency of vibration-isolating wire rope coupling, method for evaluating the effectiveness of vibration isolation of the coupling.

Введение

Решение важнейшей задачи создания и внедрения принципиально новых деталей и узлов машин, превосходящих по своим технико-экономическим показателям лучшие мировые достижения, повышения эффективности, улучшения качества и надежности во многом зависит от их долговечности. Муфты, входящие во многие механизмы и машины, являются ответственными узлами, часто определяющими надежность и долговечность всей машины. Многообразие существующих конструкций муфт, а также

постоянное их совершенствование и развитие свидетельствует о предъявляемых к ним высоким требованиям в соответствии с условиями эксплуатации дизельных установок с муфтами [1-3].

Создание виброизолирующих муфт приводов, эффективных по всем трем направлениям (x, y, z) колебательных составляющих, является весьма сложной задачей.

Следует отметить также, что на практике после текущего или капитального ремонта дизельной электростанции, связанного с разборкой, восстановлением или заменой непригодных к дальнейшему использованию деталей и узлов, в том числе и муфт, сборкой, монтажом и регулировкой,

при нормировании вибрации морским регистром зачастую она превышает допустимые нормы [4].

Представленная статья является логическим продолжением ранее опубликованных работ авторов по канатным муфтам приводов «MAMSAR+A» [1-3].

Актуальность настоящей статьи заключается в опубликовании разработанной и реализованной оригинальной методики для экспериментальной оценки коэффициента эффективности вибрационной защиты (КЭВЗ) опытного образца запатентованной канатностержневой муфты «MAMSAR+A» [5-7].

Целью исследований является экспериментальная оценка коэффициента эффективности вибрационной защиты канатностержневой муфты с высокой точностью, минимальными сроками и затратами на проведение эксперимента.

Поставленная цель достигается разработкой и реализацией следующих основных задач:

1. Выбор привода и потребителя энергии для экспериментальной оценки КЭВЗ разработанного и созданного опытного образца запатентованной КСМ «MAMSAR+A» [5-7].

2. Разработка оригинальной методики экспериментальной оценки коэффициента эффективности КСМ [5-7].

3. Практическая реализация методики экспериментальной оценки коэффициента эффективности КСМ.

4. Анализ результатов экспериментальных исследований.

5. Выводы и предложения.

1. Выбор объекта для экспериментальной оценки КЭВЗ разработанного и созданного опытного образца муфты КСМ

В качестве объекта для экспериментальной оценки КЭВЗ разработанного и созданного опытного образца запатентованной КСМ выбран специально созданный для этой цели оригинальный лабораторный экспериментальный дизель-генераторный агрегат ДГА-8,83 (рис. 1), состоящий из приводного дизеля 2 марки 2Ч 8,5/11 (рис. 1, 2), генератора 3 постоянного тока КГ-5,6, соединенных муфтой КСМ 4 (рис. 1, а) [5-8].

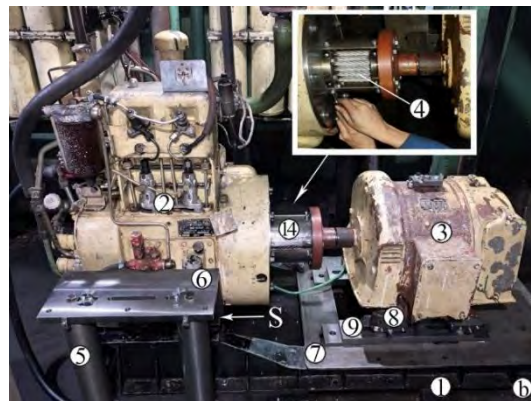
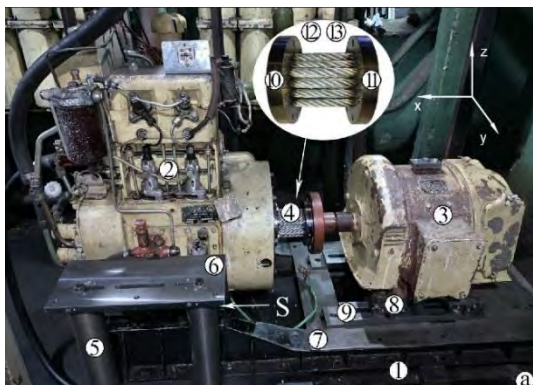


Рис. 1– Экспериментальный дизель-генераторный агрегат ДГА-8,83

а – с муфтой КСМ, б – с заблокированной муфтой с помощью двух жестких толстостенных полуцилиндрических пластин

1 – общий фундамент экспериментальной установки;

2 – приводной дизель 2Ч 8,5/11;

3 – генератор постоянного тока КГ-5,6; 4 – КСМ;

5 – стойки – жесткое крепление дизеля с общим фундаментом агрегата; 6 – правый и левый опорные кронштейны (лапы) дизеля;

7 – промежуточная рама генератора с жестким креплением к общему фундаменту агрегата;

8 – правый и левый опорные лапы генератора;

9 – промежуточные регулировочные опорные пластины с Т-образными пазами; S – зазор между дизелем и несущей рамой генератора;

10 и 11 – ведомый и ведущий фланцы КСМ;

12 и 13 – отверстия для крепления муфты с фланцами дизеля и генератора;

14 – блокирующие жесткие толстостенные полуцилиндрические пластины.

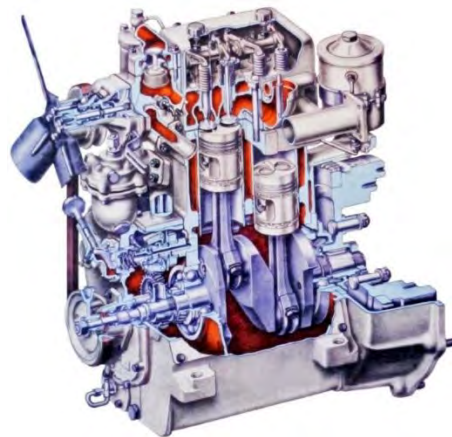


Рис. 2 – Дизель 2Ч 8,5/11

2. Методика экспериментальной оценки коэффициента эффективности КСМ

Согласно литературе [8-10] термин «Коэффициент эффективности вибрационной защиты» или сокращенно «коэффициент эффективности» – это отношение пикового или среднего квадратического значения виброперемещения (виброскорости, виброускорения защищаемого объекта или воздействующей на него силы) до введения виброзащиты к значению той же величины после введения виброзащиты. То есть,

оценка эффективности упругих опорных связей (опорных виброизоляторов) осуществляется по результатам двух замеров на фундаменте. Для первого замера дизель-генератор закрепляется жестко к фундаменту, а для второго замера – связь упругая, т.е. с помощью виброизоляторов. Вычисленная разница уровней вибрации на фундаменте при жестком и упругом креплениях дает оценку коэффициента эффективности вибрационной защиты виброизоляторов.

Учитывая, что упругие муфты относятся к неопорным связям и в машинах, в том числе и в дизель-генераторах, то есть также являются виброизолирующими элементами, то авторами впервые предложено провести аналогичную оценку КЭВЗ применительно к муфтам с разработкой специальной оригинальной методики [12].

Суть методики заключается в поэтапном решении следующих задач [12]:

1. Первый этап – экспериментальные исследования с упругим соединением – виброизолирующей муфтой типа КСМ (рис. 1, а);

2. Второй этап – экспериментальные исследования с жестким соединением 14 (рис. 1, б) без демонтажа дизеля 2, генератора 3 и муфты 4 (рис. 1) и без нарушения качества центровки.

Оригинальность методики заключается в следующем [12]:

1. Регистрация вибрации с использованием современной мобильной системы сбора и предварительной обработки экспериментальных данных [11] проводится одновременно на всех восьми опорных лапах ДГА в трех осях координат при восьми режимах работы: 800; 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 об/мин;

2. Экспериментальные исследования с жестким соединением 14 (рис. 1, б) проводятся без демонтажа дизеля 2, генератора 3 и муфты 4 (рис. 1), что не нарушает качество центровки и обеспечивает одинаковое состояние взаимосвязи дизеля с генератором [12];

3. Высокая достоверность полученных результатов экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования осуществляются по следующему плану [12]:

1 Устанавливают дизель 2 и генератор 3 соответствующими опорными лапами 6 и 8 на стойки 5 и раму 7 (рис. 1, а) с расчетным расстоянием для размещения виброизолирующей муфты КСМ 4 (рис. 1, а).

2 Крепят муфту КСМ 4 (рис. 1, а) с одной стороны 10 к генератору 3, а с другой 11 – к маховику дизеля 2.

3 Центрируют дизель 2 с генератором 3 (рис. 1).

4 Подготовка мобильной системы сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS Scadas Mobile (рис. 4) [11].

4.1 Устанавливают и надежно закрепляют в соответствующих точках 1(x, y, z) – 10 (x, y, z) акселерометры РСВ 333b32 (рис. 4, с).

4.2 Подключают акселерометры (рис. 3, 4) к соответствующим каналам блока 11 (рис. 4, е) системы.

4.3 Создают таблицу с указанием номеров точек крепления акселерометров и номеров каналов прибора, к которым подключен каждый конкретный акселерометр.

4.4 Проверяют готовность измерительной системы (рис. 4) LMS Scadas Mobile [11] к работе.

5. Готовят дизель к пуску, прогреву с одновременной проверкой работы всех акселерометров и системы LMS SCADAS Mobile [11].

6. По команде записывают в журнал экспериментальных исследований показания всех контрольных измерительных приборов с одновременным сбором экспериментальных данных всех акселерометров РСВ 333b32 (рис. 4) в систему LMS SCADAS Mobile по всем точкам 1(x, y, z) – 10 (x, y, z) (рис. 3, 4). В ходе планирования эксперимента было принято решение для данного этапа ограничиться режимами работы агрегата на холостом ходу от минимально устойчивых 800 об/мин до номинальных частот 1500 об/мин вращения с шагом 100 об/мин. Для обоснования достоверности полученных результатов регистрация вибраций проводится три раза.

7. Удостоверяются в правильности полученных результатов и останавливают двигатель.

8. Подготовка ко второму этапу экспериментальных исследований.

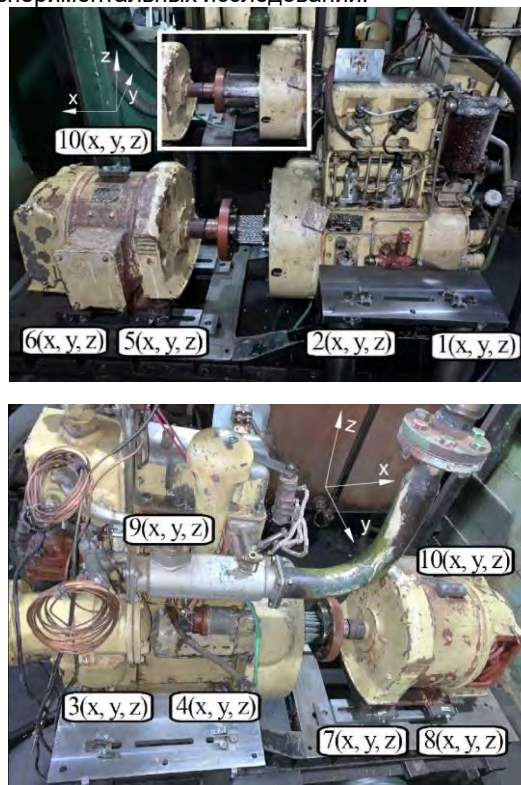


Рис. 3 — Точки измерения вибрации по трем осям координат агрегата

8.1. Производят блокировку КСМ 4 (рис. 1, а, б) с помощью двух жестких толстостенных полуцилиндрических пластин 14 (рис. 1, б). Каждая цилиндрическая пластина по краям выполнена с четырьмя отверстиями диаметром 8,5 мм под винты М8. По окружности ведущего 10 и ведомого 11 фланцев муфты 4 (рис. 1, а) предварительно резьбовые отверстия М8. Такая конструкция и способ блокировки муфты позволяют за 10 минут произвести блокировку.

8.2. Запускают и прогревают двигатель до соответствующего предела за 5-7 минут. Таким образом, для перехода к второму этапу требуется всего 15 минут.

9. Проводят трехкратные замеры по режимам аналогично пунктам 2.6 и 2.7 за 40 минут.

10. Постепенно снижают обороты двигателя до 800 мин^{-1} и согласно инструкции по обслуживанию останавливают двигатель.

11. Демонтируют мобильную систему LMS SCADAS Mobile и завершают экспериментальные исследования.

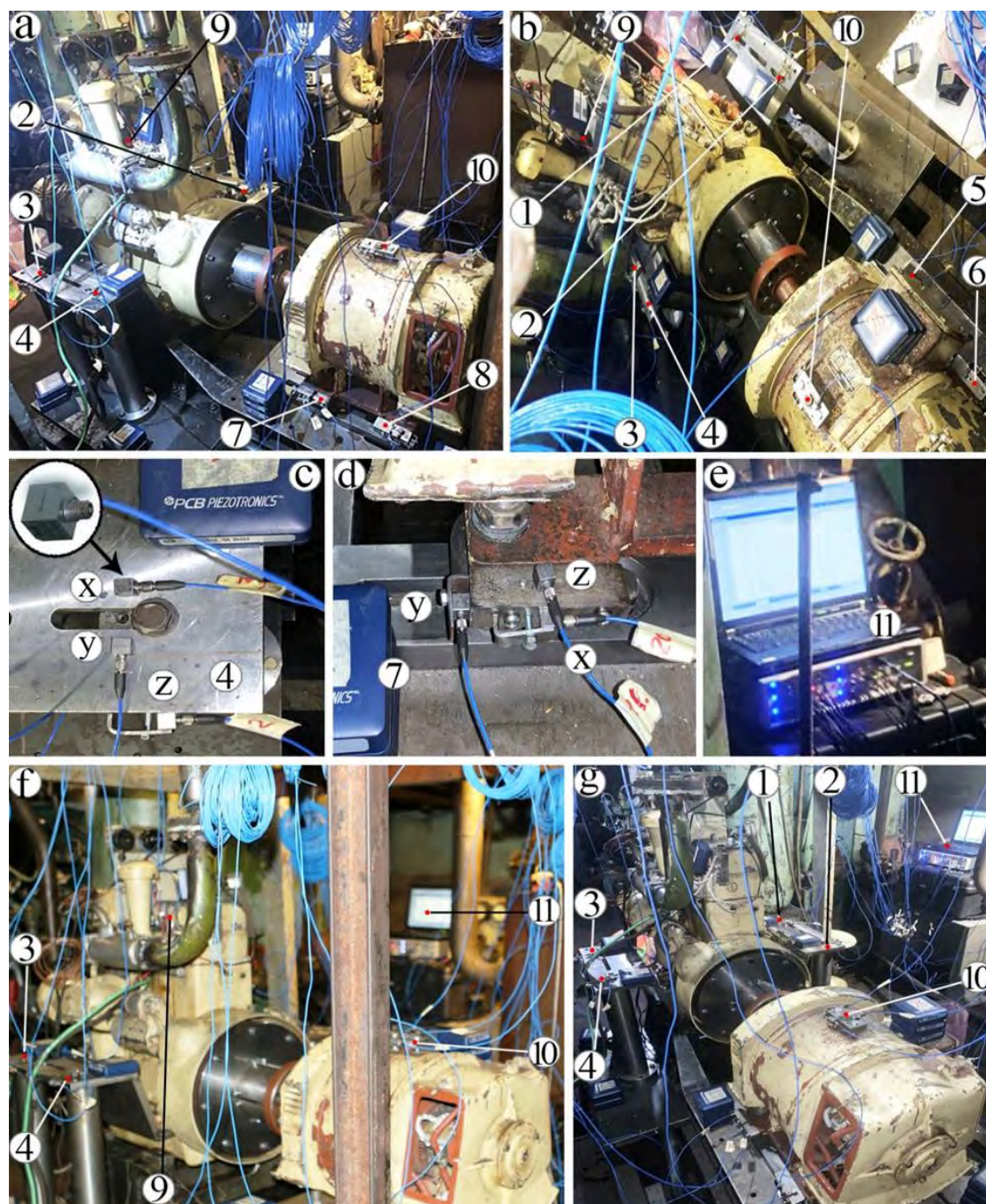


Рис. 4 – Виды агрегата с акселерометрами PCB 333в32 и мобильной системой сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS SCADAS Mobile

3. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований

С помощью мобильной системы сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS Scadas Mobile [11] замеры вибрации зарегистрированы в десяти точках по трем осям координат ($10 \times 3 = 30$ акселерометров) при восьми режимах работы агрегата. В результате получены

480 спектров вибрации (без учета трехкратных замеров).

На основе обработки и анализа указанного большого объема результатов двухэтапных экспериментальных исследований получены искомые коэффициенты эффективности по третьооктавным частотным полосам в диапазоне от 6,3 до 800 Гц (22 полосы) для частот вращения: 800;

900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 об/мин по трем осям (X, Y, Z) координат (рис. 5-9).

Существенная эффективность виброизоляции муфты агрегата относительно жесткого соединения по уровням вибрации опорных лап дизеля и генератора имеет место по оси коленчатого вала (X) и в поперечном направлении (Y) на частоте вращения 1400 об/мин, а в вертикальном направлении (Z) – на частоте вращения 800 об/мин (рис. 5).

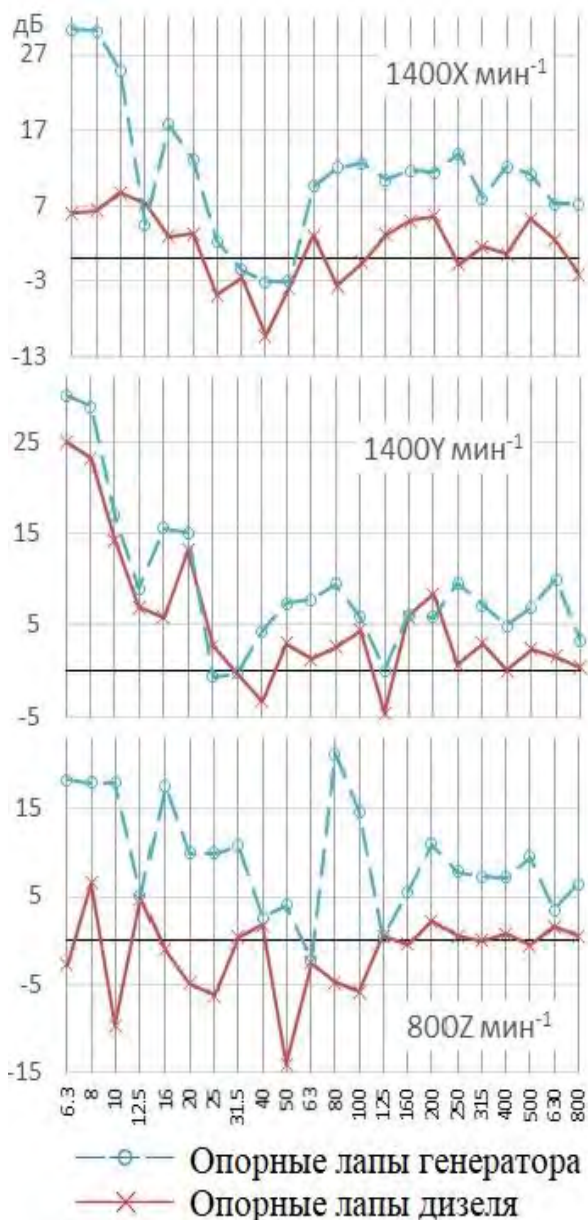


Рис. 5 – Эффективность осевой (X), поперечной (Y) и вертикальной (Z) виброизоляции муфты агрегата относительно жесткого соединения по уровням вибрации опорных лап дизеля и генератора

Соответствующие спектры осевой, поперечной и вертикальной эффективности виброизоляции муфты агрегата относительно жесткого соединения по уровням вибрации опорных лап дизеля и генератора представлены на рис. 6.

Существенная координатная (пространственная) эффективность виброизоляции муфты агрегата

относительно жесткого соединения по уровням вибрации опорных лап дизеля и генератора для частот вращения коленчатого вала: 800, 900, 1200, 1400 об/мин представлена на рис. 7, а координатные эффективности виброизоляции на опорных лапах генератора по сравнению с опорными лапами дизеля – на рис. 8.

Усредненная координатная эффективность виброизоляции генератора относительно дизеля по опорным лапам для исследуемых частот вращения представлена на рис.9.

Ранжир эффективности виброизоляции: 800 (7,94); 900 (5,03); 1200 (4,64); 1400 (4,47); 1100 (3,88); 1500 (3,69); 1300 (3,16); 1000 (2,54).

Таким образом, усреднённая координатная эффективность виброизоляции на опорных лапах генератора по сравнению с виброизоляцией на опорных лапах дизеля для исследуемых частот вращения составляет от 3 до 8 дБ.

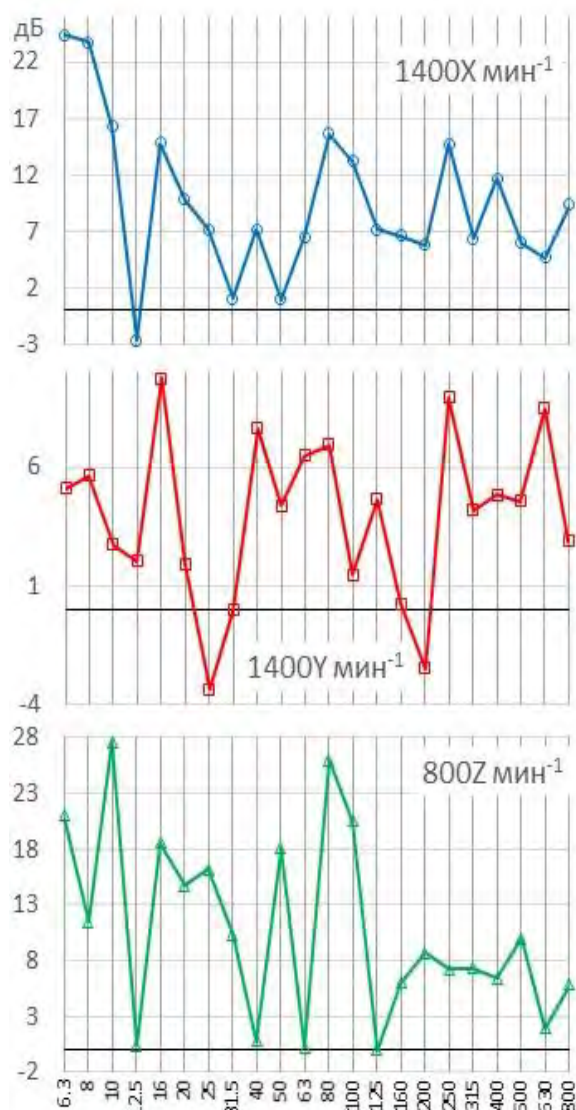


Рис. 6 – Эффективность осевой (X), поперечной (Y) и вертикальной (Z) виброизоляции генератора относительно дизеля по опорным лапам

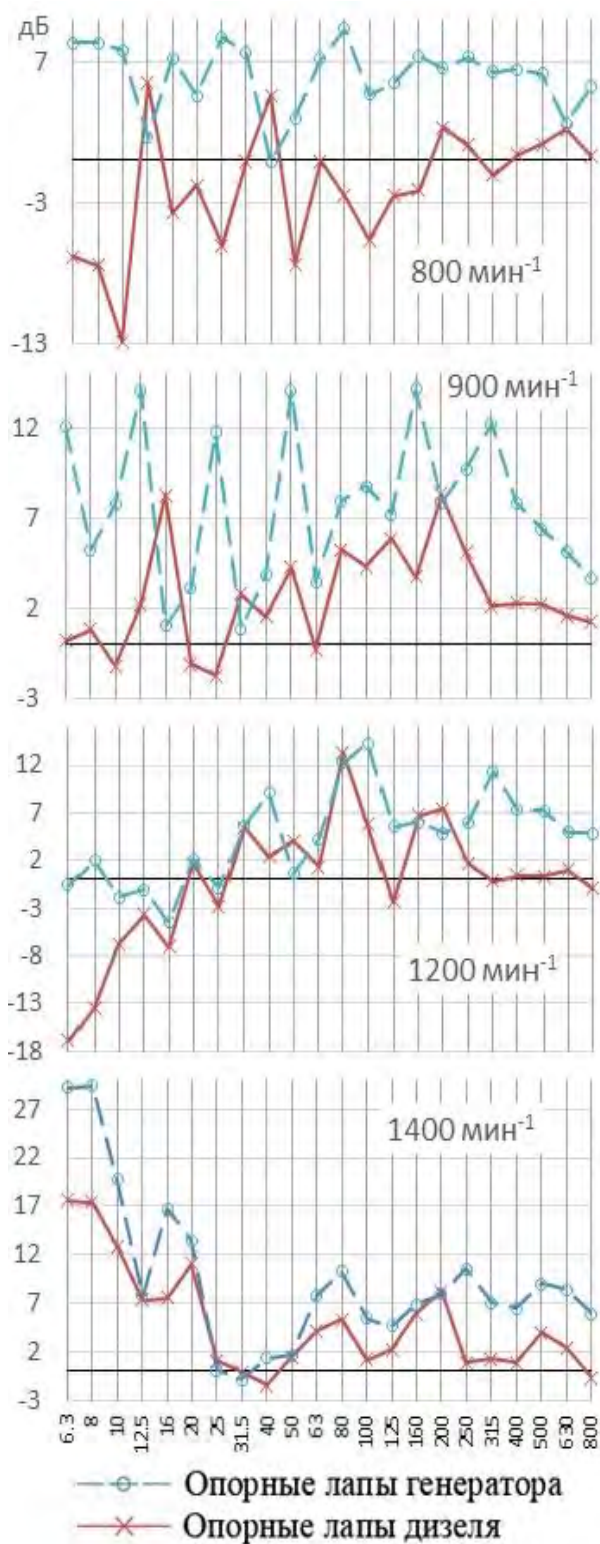


Рис. 7 – Координатная эффективность виброизоляции муфты агрегата относительно жесткого соединения по уровням вибрации опорных лап дизеля и генератора

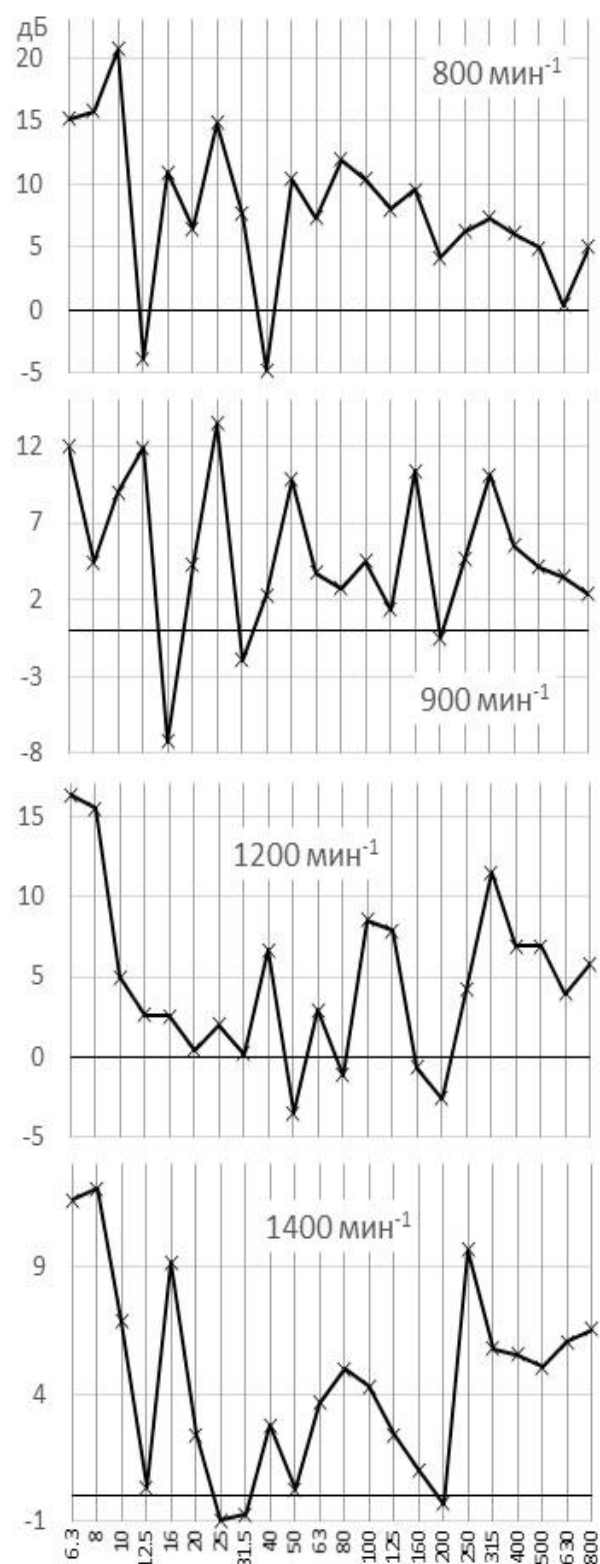


Рис. 8 – Зависимости координатной эффективности виброизоляции генератора относительно дизеля по опорным лапам

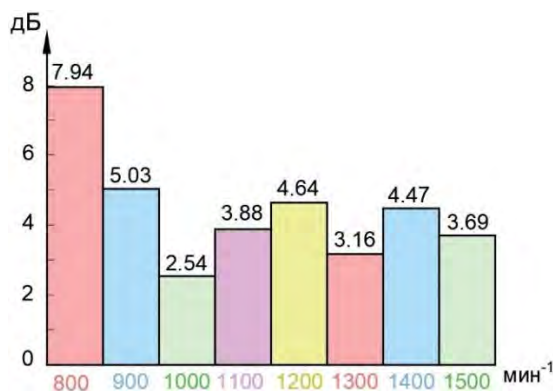


Рис. 9 – Усредненная координатная эффективность виброизоляции генератора относительно дизеля по опорным лапам для исследуемых частот вращения

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями подтверждены теоретические исследования в ранее представленных авторами публикациях о возможности применения стального каната в качестве упругого элемента в муфтах приводов на примере опытного образца запатентованной оригинальной канатносервальной муфты «MAMSAR+A» [5].

2. Благодаря оригинальности методики [12] допускается возможность широкого ее применения для различных технических объектов.

3. В дальнейшем планируются экспериментальные исследования канатносервальной муфты «MAMSAR+A» при работе агрегата под нагрузкой.

Литература

1. Минасян М.А., Минасян А.М., Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хиха. Конструктивный обзор и анализ виброизолирующих муфт с металлическими упругими элементами // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4 т1. С. 102-110.
2. Минасян М.А., Минасян А.М., Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хиха. О возможности использования канатных опор «mamsar» в качестве отдельных или сборных муфт и устройства для определения их жесткости // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1 т3. С. 93-100.
3. Минасян М.А., Цзэн Цзюньцзе, Минасян А.М. Подготовка обоснованных исходных данных для аналитических и экспериментальных исследований крутильных колебаний универсальной дизель-генераторной установки ДГ- 8,83 // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №2 т2. С. 99-106.
4. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов часть IV. Остойчивость. НД № 2-0201-104. СПб 2018. 82 с. (рис. 9.2.5, г, стр. 42).
5. Муфта: пат. № 2658208 МПК F16D 3/72 / М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 28.02.2017; опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17. 10 с.
6. Устройство для испытания упругих муфт: пат. № 199499 МПК G01M 7/06/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 24.03.2020; опубл. 03.09.2020, Бюл. № 25. 7 с.
7. Способ реализации опорной и неопорной амортизации судовой электростанции с виброактивным дизельным приводом: пат. № 2730696 МПК B63H 21/30, F16F 7/14/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 15.07.2019; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 24. 11 с.
8. ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 28 с.
9. Амортизация судовых дизельных энергетических установок. / М.А. Минасян, А.М. Минасян. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. – 360 с.
10. Дизели ч 8,5/11; ч 9,5/11. Руководство по эксплуатации 2452018 РЭ. М. СССР. Внешторгиздат. 1975. 160 с.
11. Мобильная система сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS SCADAS Mobile. Руководство пользователя.
12. Способ определения коэффициента эффективности вибрационной защиты виброизолирующих муфт судовых дизель-генераторов: пат. № 2730694 МПК B63H 21/30/ М.А. Минасян, А.М. Минасян, Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха. Патентообладатель СПбГМТУ. Заявл. 06.11.2019; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 24. 12 с.

References

1. Minasyan M.A., Minasyan A.M., Zeng Junjie, Lje Hiha. Konstruktivnyj obzor i analiz vibroizolirujushhih muft s metallicheskimimi uprugimi jelementami [Structural review and analysis of vibration-insulating couplings with metal elastic elements] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. №4 t1. S. 102-110.
2. Minasyan M.A., Minasyan A.M., Zeng Junjie, Lje Hiha. O vozmozhnosti ispol'zovanija kanatnyh opor «mamsar» v kachestve otdel'nyh ili sbornyh muft i ustrojstva dlja opredelenija ih zhestkosti // Morskie intellektual'nye tehnologii [About the possibility of using "mamsar" rope supports as separate or prefabricated couplings and a device for determining their rigidity]. 2020. №1 t3. S. 93-100.
3. Minasyan M.A., Zeng Junjie, Minasyan A.M. Podgotovka obosnovannyh ishodnyh dannyh dlja analiticheskikh i jeksperimental'nyh issledovanij krutil'nyh kolebanij universal'noj dizel'- generatornoj ustanovki DG-8,83 [Preparation of reasonable initial data for analytical and experimental studies of torsional vibrations of the universal diesel generator set DG-8.83] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2020. №2 t2. S. 99-106.
4. Rossijskij morskij registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskijh sudov chast' IV. Ostojchivost' [Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of marine vessels part IV. Stability]. ND № 2-0201-104. SPb 2018. 82 s. (ris. 9.2.5, g, str. 42).

5. Mufta [Coupling]: pat. № 2658208 МПК F16D 3/72 / M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Zeng Junjie. Patentloobladatel' SPbGMTU. Zajavl. 28.02.2017; opubl. 19.06.2018, Bjul. № 17. 10 s.
6. Ustrojstvo dlja ispytaniya uprugih muft [Elastic coupling testing device]: pat. № 199499 МПК G01M 7/06/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Zeng Junjie, Lje Hi Ha. Patentloobladatel' SPbGMTU. Zajavl. 24.03.2020; opubl. 03.09.2020, Bjul. № 25. 7 s.
7. Sposob realizacii opornoj i neopornoj amortizacii sudovoj jelektrostantsii s vibroaktivnym dizel'nym privodom [A method for implementing the support and non-support shock absorption of a marine power plant with a vibro-active diesel drive]: pat. № 2730696 МПК B63H 21/30, F16F 7/14/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Zeng Junjie, Lje Hi Ha. Patentloobladatel' SPbGMTU. Zajavl. 15.07.2019; opubl. 25.08.2020, Bjul. № 24. 11 s.
8. GOST 24346-80 Vibracija. Terminy i opredelenija [GOST 24346-80 Vibration. Terms and definitions]. M.: Standartinform, 2010. 28 s.
9. Amortizacija sudovyh dizel'nyh jenergeticheskix ustanovok [Amortization of marine diesel power plants] / M.A. Minasyan, A.M. Minasyan. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. – 360 s.
10. Dizeli ch 8,5/11; ch 9,5/11. Rukovodstvo po jekspluatacii 2452018 RE [Diesel engines h 8.5 / 11; h 9.5/11. User Manual 2452018 RE]. M. SSSR. Vneshtorgizdat. 1975. 160s.
11. Mobil'naja sistema sbora i predvaritel'noj obrabotki jeksperimental'nyh dannyh LMS SCADAS Mobile [Mobile system for collecting and pre-processing experimental data LMS SCADAS Mobile]. Rukovodstvo polzovatelya.
12. Sposob opredelenija koeficienta jeffektivnosti vibracionnoj zashhity vibroizolirujushhih muft sudovyh dizel'-generatorov [Method for determining the efficiency coefficient of vibration protection of vibration-insulating couplings of marine diesel generators]: pat. № 2730694 МПК B63H 21/30/ M.A. Minasyan, A.M. Minasyan, Zeng Junjie, Lje Hi Ha. Patentloobladatel' SPbGMTU. Zajavl. 06.11.2019; opubl. 25.08.2020, Bjul. № 24. 12 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Минас Арменакович Минасян, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

Армен Минасович Минасян, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

Цзюньцзе Цзэн, аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: tzeng817@gmail.com

Minas A. Minasyan, Dr.Sci (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of computer facilities and information technology, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Junjie Zeng, graduate student of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: tzeng817@gmail.com

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 621.825.(0131)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.039>

Методика расчета муфты «mamsar+a» с канатостержневыми элементами

М.А. Минасян¹ e-mail: mamsar@mail.ru, Ц. Цзэн¹ e-mail: tzeng817@gmail.com,

А.М. Минасян¹ e-mail: mamsar@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Цель представленной статьи – ознакомление читателей с оригинальной методикой расчета канатостержневой муфты «MAMSAR+A».

Методика расчета канатостержневой муфты рассматривается применительно к экспериментальному дизель-генераторному агрегату мощностью 9,56 кВт при частоте вращения 1500 мин⁻¹ с дизелем 2Ч8,5/11 и генератором «КГ-5,6». Расчетная рабочая длина канатных стержней 90 мм, диаметр каната 12 мм с шестью одинаковыми прядями. Максимальный угол закручивания канатостержневой муфты принят 30°. Задача состоит в выводе уточненной зависимости угла закручивания от величины крутящего момента на основе теоретических и экспериментальных исследований для определения количества канатных стержней при заданных значениях диаметра и длины канатного стержня.

Оригинальность методики заключается:

1. Учитывая, что канатостержневая муфта «MAMSAR+A» содержит несколько канатных стержней, каждый из которых состоит из шести прядей, то зависимость угла закручивания от величины крутящего момента изначально рассчитывается для одной пряди.
2. Зависимость угла закручивания от величины крутящего момента пряди получена по известной формуле для цилиндрического торсиона и методом конечных элементов. Далее путем умножения результатов расчета на число прядей получены значения для одного центрального и трех канатных стержней. Оси последних расположены по диаметру окружности равномерно под углом 120°.
3. Зависимость угла закручивания от величины крутящего момента одного центрального и трех канатных стержней получена также экспериментально с использованием специально разработанных авторами устройств.
4. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены поправочные коэффициенты, обеспечивающие возможность получения точной зависимости угла закручивания канатного стержня от величины крутящего момента, а из нее уже необходимое их количество для всей муфты.

Данная методика применима также для расчета канатных муфт в том числе и для других диаметров каната.

Ключевые слова: Канатная муфта дизель-генератора, устройство для статических испытаний канатных стержней на кручение.

Method for calculating the «mamsar+a» coupling with rope-core elements

Minas A. Minasyan¹ e-mail: mamsar@mail.ru, Junjie Zeng¹ e-mail: tzeng817@gmail.com,

Armen M. Minasyan¹ e-mail: mamsar@mail.ru,

¹St. Petersburg State marine technical university, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Abstract The purpose of this article is to familiarize readers with the original method of calculating the rope-rod coupling «MAMSAR+A».

The method of calculating the rope-rod coupling is considered in relation to an experimental diesel generator unit with a power of 9.56 kW at a rotation speed of 1500 min⁻¹ with a diesel 2H8,5/11 and a generator "KG-5.6". The estimated working length of the rope rods is 90 mm, the diameter of the rope is 12 mm with six identical strands. The maximum twisting angle of the rope-rod coupling is 30°. The task is to derive a refined dependence of the twisting angle on the torque value based on theoretical and experimental studies to determine the number of rope rods at specified values of the diameter and length of the rope rod.

The originality of the method:

1. Considering that the «MAMSAR+A» rope-rod coupling contains several rope rods, each of which consists of six strands, the dependence of the twisting angle on the torque value is initially calculated for one strand.
2. The Dependence of the twist angle on the value of the torque of the strand is obtained by the well-known formula for the cylindrical torsion and the finite element method. Further, by multiplying the calculation results by the number of strands, the values for one Central and three rope rods are obtained. The axes of the latter are evenly spaced along the circumference of the circle at an angle of 120°.
3. The Dependence of the twisting angle on the torque value of one Central and three rope rods was also obtained experimentally using devices specially developed by the authors.
4. Based on theoretical and experimental studies, correction coefficients have been obtained that make it possible to obtain an exact dependence of the twisting angle of the rope rod on the torque value, and from it the necessary number of them for the entire coupling.

This method is also applicable for calculating rope couplings, including for other rope diameters.

Key words: Cable coupling of a diesel generator, a device for static testing of cable rods for torsion.

Введение

Виброизолирующая муфта дизель-генераторного агрегата является весьма важным узлом, особенно для местной системы амортизации, например, когда

дизель связан с несущей рамой упругой связью – опорными виброизоляторами, а генератор – жесткой, или, когда оба на виброизоляторах и т.д. Главная задача муфты – обеспечить передачу крутящего момента на вал при одновременном уменьшении

крутильной, продольной и поперечной составляющих вибрации [1-3].

Создание виброизолирующей муфты, эффективной по всем трем направлениям колебательных составляющих, является весьма сложной задачей.

Чаще всего используют конструкции, обеспечивающие виброизоляцию колебаний по одному направлению (например, при кручении) [3].

Необходимость представления настоящей работы на суд читателей – ознакомление с новыми исследованиями, связанными с применением стального каната в качестве упругого элемента муфт приводов [4, 5].

Стальные канаты в настоящее время в качестве упругих элементов уже успешно применяются в качестве опорных виброизоляторов в различных технических объектах [6]. А что касается их применения в качестве упругих элементов в муфтах приводов, пока еще недостаточно публикаций [7]. По мнению авторов, одна из причин – сложность расчета, обеспечения виброизолирующей эффективности, нагрузочной способности и долговечности стального каната.

Другая причина представления статьи связана логически продолжением ранее опубликованных работ по данной проблематике, связанных с научной деятельностью авторов.

Оригинальность представленной статьи заключается не только в самой методике, но и в конструкции запатентованной муфты и применении специальных средств статических испытаний канатных упругих стержней) [5].

Актуальность работ по созданию канатных муфт, по мнению авторов, заключается в том, что канатные упругие элементы при работе технического объекта, например, дизель генератора, не нагреваются, как это имеет место у резиновых муфт, особенно, когда муфта находится в закрытом пространстве под кожухом.

Целью представленной статьи является ознакомить читателей с оригинальной методикой расчета канатностержневой муфты «MAMSAR+A».

Методика расчета канатностержневой муфты рассматривается применительно к экспериментальному дизель-генераторному агрегату мощностью $P = 9,56 \text{ кВт}$ (ДГА-9,56) при частоте вращения $\omega = 1500 \text{ мин}^{-1}$ [5]. Расчетная рабочая длина канатных стержней $l = 90 \text{ мм}$, диаметр каната $d = 12 \text{ мм}$. Максимальный угол закручивания муфты принят $\varphi = 30^\circ$. Задача состоит в выводе уточненной зависимости угла закручивания от величины крутящего момента на основе теоретических и экспериментальных исследований для определения количества канатных стержней при заданных значениях диаметра и длины канатного стержня.

1. Экспериментальное определение статической скручивающей характеристики канатностержневого торсиона и устройство для его осуществления

ДГА-9,56 обеспечивает возможность экспериментальных исследований эффективности опытного образца канатностержневой муфты [5]

Соответствующий крутящий момент:

$$M_{\max} = \frac{9549 \cdot P_{\max}}{n} = \frac{9549 \times 9,56}{1500} = 61, \text{ Н} \cdot \text{ м} \quad (1)$$

На основе предварительных теоретических исследований скручивающей нагрузочной характеристики и полученных предполагаемых неудовлетворительных результатов авторы пришли к выводу первоначально провести экспериментальные исследования, а затем на основе полученных результатов в известную формулу угла закручивания торсиона ввести поправочный коэффициент.

Специально разработанное и созданное устройство для экспериментального определения статической нагрузочной характеристики канатного стержневого торсиона представлено на рис. 1.

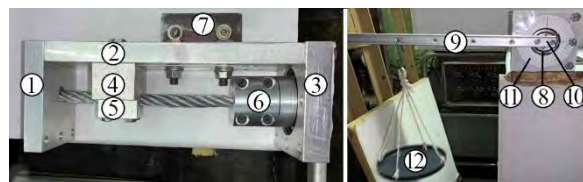


Рис. 1 – Устройство для экспериментального определения статической нагрузочной характеристики канатностержневых торсионов диаметром каната от $d = 2$ до 12 мм (на рисунке диаметр каната $d = 12 \text{ мм}$)

1-3 – П-образная рама (1 – поперечная пластина, 2 – продольная пластина, 3 – корпус подшипника); 4 – поворотнонеподвижный регулируемый в продольном направлении захват; 5 – крышка захвата; 6 – продольнонеподвижный поворотный захват; 7 – кронштейн крепления приспособления к верстаку (столу); 8 – подшипник; 9 – рычаг (коромысло); 10 – крепление рычага к торцу продольнонеподвижного поворотного захвата; 11 – шкала (градусы); 12 – чашка для гири (разновесов).

Устройство обеспечивает возможность определения нагрузочных характеристик канатных стержневых торсионов для заданных диаметров каната длины от $l = 1$ до 170 мм .

Для канатной муфты ДГА-9,56 выбран канат диаметром $d = 12 \text{ мм}$ с максимальной длиной $l_{\max} = 200 \text{ мм}$

Возможность исследования статической характеристики торсиона от $l = 1$ до 170 мм обеспечивается поворотнонеподвижным регулируемым в продольном направлении 4, 5 (рис. 1) и продольнонеподвижным поворотным 6 захватами.

На основе анализа результатов экспериментальных исследований выбрана оптимальная длина торсиона $l = 90 \text{ мм}$.

Нагрузочная характеристика торсиона, полученная по результатам экспериментальных исследований, представлена на рис. 2.

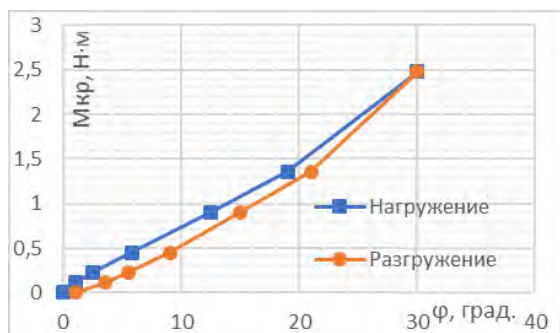


Рис. 2 – Нагрузочная характеристика канатостержневого торсиона диаметром $d = 12\text{ мм}$ и длиной $l = 90\text{ мм}$

Таким образом, для заданного значения крутящего момента $M_{кр} = 61\text{ Н} \cdot \text{м}$ при угловой деформации $\varphi = 30^\circ$ потребуется

$$\frac{M_{\max}}{M_{кр}} = \frac{61}{2,482} = 24,6 \approx 25 \quad (2)$$

торсионов.

2. Определение координат перфорации для компактного размещения и крепления концов канатных стержней.

Определив примерное количество канатных стержней, приступают к определению минимального рабочего диаметра окружности, в пределах которого производят перфорирование для размещения соответствующих концов канатных стержней с последующей их сваркой.

Для обеспечения компактности расположения канатных стержней по принципу использования вершин равностороннего или правильного треугольника, определяется оптимальное значение его сторон L по формуле (рис. 3)

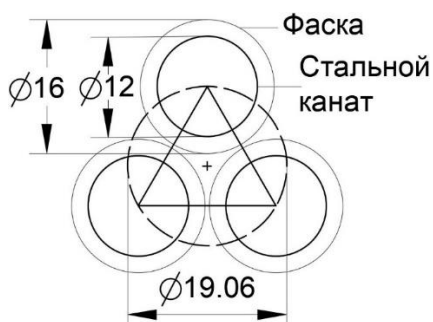


Рис. 3 – Отверстия первой группы канатных стержней

$$L = d_k + 2r_{\phi} + 0,5 = 12 + 2,2 + 0,5 = 16,5 \quad (3)$$

где d_k – диаметр канатного стержня; r_{ϕ} – радиус закругленных фасок отверстий; 0,5 – величина перемычки фасок.

Построив равносторонний треугольник со сторонами $L = 16,5\text{ мм}$, вписанный в окружность радиусом

$$R_L = \frac{L}{2 \cdot \cos 30^\circ} = \frac{16,5}{2 \cdot 0,866} = 9,53, \text{ мм} \quad (4)$$

или диаметром расположения осей трех канатных стержней $D_L = 19,06\text{ мм}$, последовательно получают расположение остальных 24 осей канатных стержней, представленных на рис. 4 и в табл. 1.

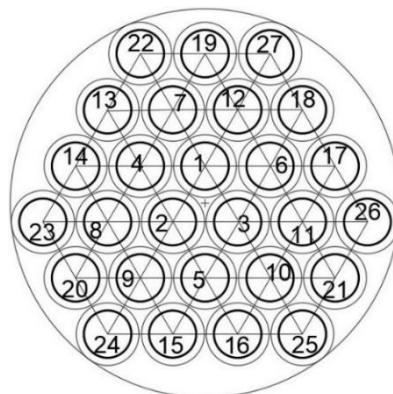


Рис. 4 – Расположение канатных стержней

Таблица 1

Координаты размещения осей отверстий канатных стержней по образованным группировкам и количество на соответствующих концентрических окружностях

№ групп	D_{0i} , мм	R_i , мм	n_i , шт.
I	19,0	9,5	3
II	38,0	19,0	3
III	50,4	25,2	6
IV	68,6	34,3	6
V	76,2	38,1	3
VI	83,0	41,5	6
			$\Sigma 27$

Таким образом, с учетом коэффициента запаса и обеспечения симметричности расположения окончательное количество канатных стержней для создания опытного образца канатной муфты принимаем равным 27.

3. Расчет канатостержневой муфты

Канатостержневой торсион относится к канату типа ТК 6х24 (рис. 5).



Рис. 5 – Канатный стержень диаметром 12 мм длиной 90 мм

а – реальный канатный стержень (фотография); б – 3D-модель канатного стержня.

3.1 Аналитическое определение угла закручивания одной канатной пряди и канатостержневого торсиона от нагружающего момента

Стальные канаты относятся к сложным проволочным изделиям, обладают сильно выраженными реономными свойствами. Определение технических упругих постоянных с необходимой точностью выполнить невозможно..

Поэтому нами предложено для аналитического определения угла закручивания от нагружающего момента рассматривать только одну прядь из шести на основе известной формулы [9].

$$\varphi = \frac{M \cdot l \cdot 32}{G_{\text{пр}} \cdot \pi \cdot d_{\text{пр}}^4}, \text{ рад} \quad (5)$$

или

$$\varphi = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot 10 \cdot \frac{M \cdot l}{G_{\text{пр}} \cdot d_{\text{пр}}^4}, \text{ град} \quad (6)$$

где: M – крутящий момент; $l = 90\text{мм} = 0,09\text{м}$ – длина пряди; $d_{\text{пр}} = 4\text{мм} = 0,004\text{м}$ – диаметр пряди;

G – модуль сдвига каната, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$; $\mu = 0,25$ –

коэффициент Пуассона, $E = 1,4 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости первого рода стального каната; тогда

$$G = \frac{1,4 \times 10^{11}}{2(1+0,25)} = 5,6 \times 10^{10}, \text{ Н/м}^2; \text{ канат состоит из 6}$$

прядей, поэтому для одной пряди надо разделить на 6, т.е.

$$G_{\text{пр}} = \frac{G}{6} = \frac{5,6 \times 10^{10}}{6} = 9,33 \times 10^9, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Нагрузочная характеристика одной пряди по полученным значениям угла закручивания от нагружающих крутящих моментов в пределах $0,03 - 0,43\text{Н} \cdot \text{м}$ с интервалом $0,03 \text{ Н} \cdot \text{м}$ представлена на рис. 6.

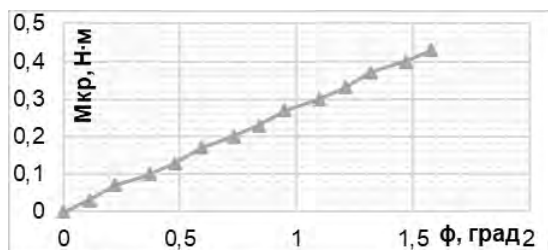


Рис. 6 – Нагрузочная характеристика пряди каната, полученная по формуле (6)

3.2 Определение угла закручивания одной канатной пряди и канатностержневого торсиона методом конечных элементов

Для выполнения расчетов методом конечных элементов (МКЭ) в среде Ansys в результате теоретических исследований пришли к выводу о целесообразности построения 3D-модели для пряди, а не всего каната. По измерениям и по [8] и по ИСО 2408:2017 тип каната (6x24+7FC); диаметр стержня каната $d_{\text{тр}} = 12\text{мм}$; диаметр пряди $d_{\text{пр}} = 4\text{мм}$; диаметр проволоки $d_{\text{прв}} = 0,65\text{мм}$.

3D-модель одной пряди каната и канатного стержня представлена на рис. 7.

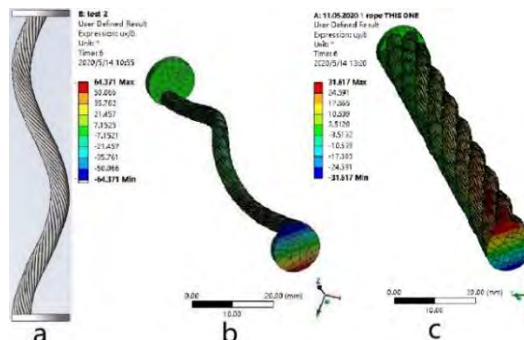


Рис. 7 –Прядь каната и канатный стержень

а – 3D модель пряди каната в SolidWorks; б – модель пряди каната по МКЭ; с – 3D модель канатного стержня

При вводе 3D-модели в среду Ansys для учета контакта между проволоками следует добавить pinball radius $0,2 \text{ мм}$ [10-12] с целью достижения точности результатов вычислений.

На основе полученных МКЭ значений углов закручивания пряди каната при заданных значениях крутящего момента нагрузочная характеристика торсиона представлена на рис. 8.

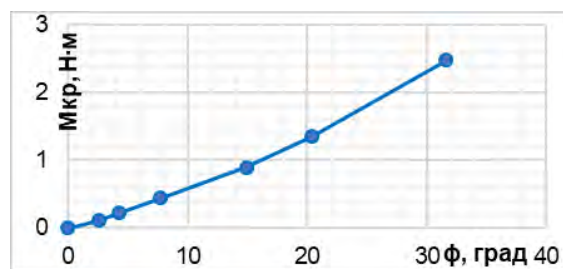


Рис. 8 – Нагрузочная характеристика канатностержневого торсиона, полученная МКЭ

3.3 Определение поправочного коэффициента к формуле угла закручивания для канатностержневого торсиона

На основании полученных результатов (рис. 2, 6 и 8) поправочный коэффициент равен

$$k_0 = \frac{\varphi_a^T}{\varphi_a} = \frac{30,5}{9,5} = 3,2 \quad (7)$$

а уточненная формула угла закручивания для канатностержневого торсиона:

$$\varphi = \frac{32M \cdot l \cdot k_0}{G \cdot \pi \cdot d_{\text{пр}}^4}, \text{ рад} \quad (8)$$

или

$$\varphi = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{10M \cdot l \cdot k_0}{G \cdot d_{\text{пр}}^4}, \text{ град} \quad (9)$$

3.4 Экспериментальное определение статической скручивающей характеристики дезаксиального канатностержневого торсиона и устройство для его осуществления

Для разработки муфты экспериментальное определение статической скручивающей характеристики дезаксиально расположенных канатных стержней имеет важное значение, поскольку в стержнях при работе муфты

одновременно возникают угловые и изгибные деформации.

Учитывая, что все канатные стержни по шести группам расположены по концентричному окружностям для экспериментальных исследований достаточно использовать одну из них. Наиболее целесообразным является исследовать пятую группу, состоящую из трех канатостержневых торсионов с диаметром осей расположения $D_{05} = 76,2\text{мм}$ (или радиусом $R_{05} = 38,1\text{мм}$) (табл. 1 и рис. 4).

Соответствующее устройство представлено на рис. 9, нагрузочная характеристика – на рис. 10.

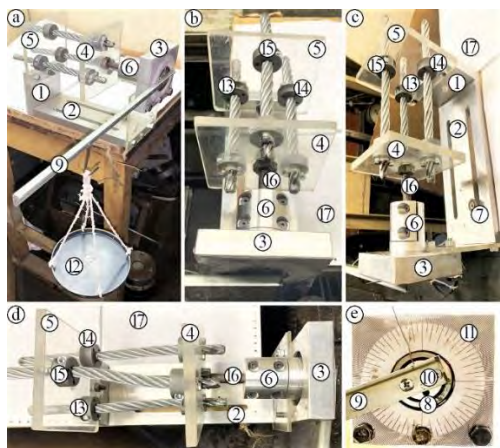


Рис. 9 – Устройство для экспериментального определения статической нагрузочной характеристики трех канатных стержней диаметром 12 мм

а – устройство с рычагом и чашкой для разновесов; b, c – виды приспособления с канатными стержнями в исходном положении (без нагружения крутящим моментом); d – вид приспособления с канатными стержнями (в нагруженном состоянии под действием крутящего момента); e – вид устройства со стороны шкалы с подшипником и рычагом; 1-3 – П-образная рама (1 – поперечная пластина, 2 – продольная пластина, 3 – корпус подшипника); 4, 5 – поворотная и неподвижная пластины; 6 – продольнонеподвижный поворотный захват; 7 – крепление устройства к верстаку; 8 – подшипник; 9 – рычаг; 10 – крепление рычага к торцу продольнонеподвижного поворотного захвата; 11 – шкала (градусы); 12 – чашка для гири (разновесов); 13, 14, 15 – специальные крепежные средства для крепления канатов с пластинами 4 и 5; 16 – повторный вал; 17 – верстак-стол.

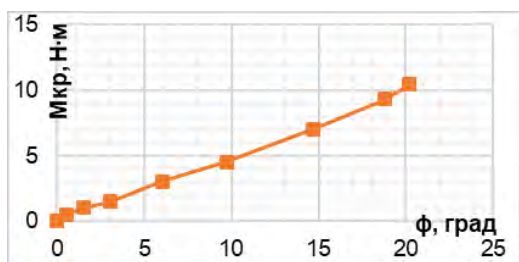


Рис. 10 – Нагрузочная характеристика трех канатостержневых торсионов диаметром 12 мм, длиной 90 мм и радиусом осей их расположения 38,1 мм, полученная экспериментальным путем

3.5 Статические скручивающие характеристики дезаксиальных канатных стержней, полученные на основе экспериментальных результатов и расчета МКЭ

На рис. 11 представлена конечно-элементная модель, а на рис. 12 нагрузочная характеристика, полученная с помощью данной модели [12].

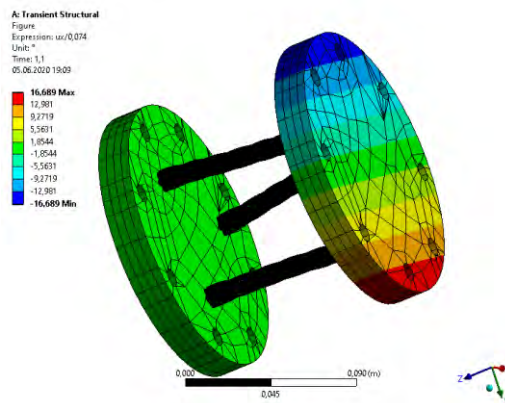


Рис. 11 – Конечно-элементная модель трех дезаксиальных канатных стержней радиусом осей их расположения 38,1 мм



Рис. 12 – Нагрузочные характеристики одного дезаксиального с радиусом 38,1 мм канатного стержня, полученная МКЭ

Как следует из рис. 10 и 12 нагрузочная характеристика полученная МКЭ совпадает с экспериментально полученной только до угла закручивания примерно $\varphi = 5^\circ$

Поправочный коэффициент при $M_{кр} = 10H \cdot м$

$$k_5 = \frac{\varphi_a}{\varphi_3} = \frac{39,1}{20} \approx 2 \quad (10)$$

Т.е. при радиусе расположения $R_{05} = 38,1\text{мм}$ результат по формуле больше эксперимента в 2 раза.

3.6 Вывод общего уравнения поправочного коэффициента дезаксиальноканатных стержней муфты

Тангенциальные напряжения, вызывающие крутящий момент, распределены в поперечном сечении диска линейно, поэтому поправочный коэффициент также должен расти линейно с увеличением радиуса расположения центра

канатного стержня R_i или для удобства используем

индекс канатного стержня т.е.: $r_i = \frac{R_i}{d_k}$.

Тогда линейная функция поправочного коэффициента в зависимости от индекса и числа канатных стержней будет иметь вид:

$$k_i = a \cdot r_i + b \quad (11)$$

где i – номер групп канатных стержней; r_i – индекс канатного стержня группы; R_i – радиус расположения центра канатного стержня; d_k – диаметр канатного стержня.

Из формул (7 и 10) для торсиона и дезаксиального ($R_{05} = 38,1\text{мм}$) стержня следует:

$$k_{01} = \frac{3,2}{1}; k_{05} = \frac{3,2}{2}$$

Поставив эти значения в (11)

$$\begin{cases} \frac{3,2}{2} = a \times 3,175 + b \\ \frac{3,2}{1} = a \times 0,792 + b \end{cases}$$

откуда

$$\begin{cases} a = -0,671 \\ b = 3,732 \end{cases}$$

тогда на основании (11) общее уравнение поправочного коэффициента будет иметь вид:

$$k_i = -0,671r_i + 3,732 \quad (12)$$

Подставляя в уточненные (8) и (9) формулы поправочный коэффициент k_i (12), окончательно получим значения углов закручивания φ_i во всех группах и канатной муфты в целом от приложенного крутящего момента (рис. 13, 14 и табл. 2):

$$\varphi = \frac{32M \cdot l \cdot k_i}{N \cdot G_{пр} \cdot \pi \cdot d_{пр}^4}, \text{ рад} \quad (13)$$

или

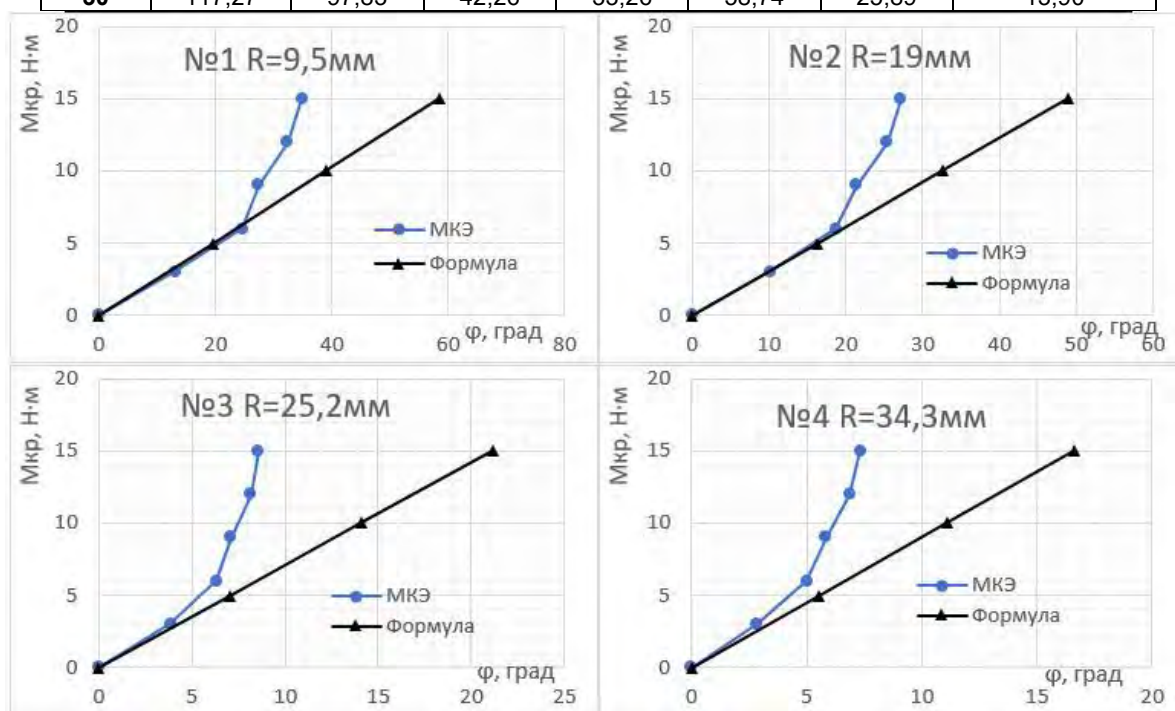
$$\varphi = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{10M \cdot l \cdot k_i}{N \cdot G_{пр} \cdot d_{пр}^4}, \text{ град} \quad (14)$$

где: N – количество канатных стержней в группе (табл. 1).

Таблица 2

Углы закручивания φ_i во всех группах и в канатной муфте

Мкр Н-м	φ_1 , град	φ_2 , град	φ_3 , град	φ_4 , град	φ_5 , град	φ_6 , град	$\varphi_M = \frac{\sum_{i=1}^6 \varphi_i}{27}$
0	0	0	0	0	0	0	0
5	19,54	16,30	7,04	5,54	9,79	4,32	2,32
10	39,09	32,61	14,09	11,09	19,58	8,63	4,63
15	58,63	48,91	21,13	16,63	29,37	12,95	6,95
20	78,18	65,22	28,18	22,17	39,16	17,26	9,27
25	97,72	81,52	35,22	27,72	48,95	21,58	11,58
30	117,27	97,83	42,26	33,26	58,74	25,89	13,90



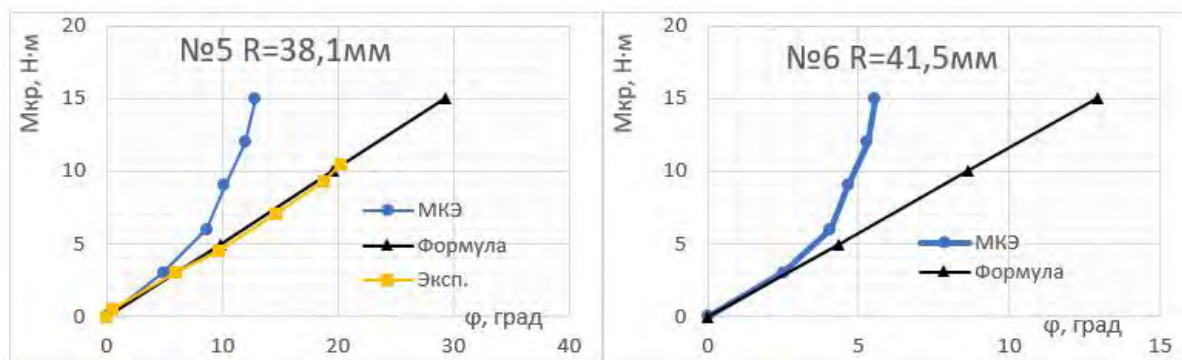


Рис. 13 – Нагрузочные характеристики всех групп

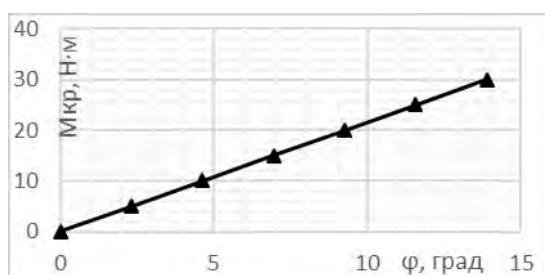


Рис. 14 – Нагрузочная характеристика канатостержневой муфты, полученная с учетом поправочного коэффициента K_1

Выводы

1. Теоретические и экспериментальные исследования нагрузочных характеристик методом конечных элементов целесообразны только для

малых (до $\phi = 30^\circ$) углов закручивания канатных стержней.

2. На основе экспериментальных и аналитических исследований канатных стержней получено общее уравнение поправочного коэффициента для стержней группами, расположенными по концентрическим окружностям.

3. Получена уточненная формула по определению угла закручивания канатостержневой муфты от приложенных крутящих моментов.

4. Полученная уточненная формула угла закручивания от воздействия крутящего момента обеспечивает возможность ее использования на стадии проектирования канатостержневых муфт.

5. В настоящее время авторы намерены заниматься проектированием и созданием канатостержневой муфты для исследуемого в данной работе ДГА–9,56 с дизелем 2Ч8,5/11 и генератором «КГ-5,6».

Литература

1. Фироуз, Ж., Гхассеми Х., Вакилабади, К.А. Уравнения колебаний связанных крутильных, продольных и поперечных колебаний гребного вала на судна / Научный Журнал 2020. № 61. С. 121-129.
2. Нелинейная модель и качественный анализ связанных осевых / крутильных колебаний бурильной колонны / Рен Ф., Уанг Б., Чен С., и др / Издательская Корпорация Хиндави 2016. № 1646814. С. 1-17.
3. Хо М., Нам Т., Ли Ж. Самовозбуждающаяся крутильная вибрация в гибкой муфте судовой двигательной валовой системы, использующей карданные валы / Журнал Морской Науки и Техники 2020. № 8 С. 348-360.
4. Электронный Каталог XX Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 5-8 апреля 2017 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
5. Муфта : пат. 2658208 РФ, МПК F16D 3/72 / М.А. Минасян, А.М. Минасян, Ц. Цзэн. заявл; 28.02.2017; опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17. 10 с.
6. Ельник А. Г., Антомошкин А.Ю. Защита судового оборудования от ударов и вибрации с помощью спиральных тросовых виброизоляторов// Судостроение за рубежом. 1985. № 10, С.15 – 25.
7. Тросовая гибкая муфта : пат. CN 105134813 A Китайская Народная Республика : МПК F16D 3/52. / Zeng Ming, Fang Xi, Zhu Xiaomei, Zhang Jinnan; заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. - № 201510652036.2; заявл. 12,10,2015; опубл. 09,12,2015. – 6 с.
8. Анализ напряжения и усталости каната на основе Ansys Workbench / У.М. Чжу и др. / Подъемно-транспортное оборудование. 2016. № 2. С. 34-38.
9. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие / под ред. П.Н. Учаева. 3-е изд. М: машиностроение, 1988. 544 с.
10. Фан Ц.Ф. Динамическое моделирование модели структуры стального троса / Китайский академический журнал электронное издательство 2009. №2. С. 71-75.
11. Праото И.; Мазлан Р.Б. Расчетные, механические и металлургические свойства канатов при растяжении / Вычислительное Материаловедение 2012. №56. С. 174-178.
12. Компьютерное моделирование проволочных прядей и канатов Часть I теория и компьютерная реализация / Станова Е. [и. др] / Достижения в области инженерного программного обеспечения. 2011. №42. С. 305-315.

References

1. Firouz, Zh., Ghassemi H., Vakilabadi, K.A. Uravnenija kolebanij svjazannyh krutil'nyh, prodol'nyh i poperechnyh kolebanij grebnogo vala na sudna [Vibration Equations of The Coupled Torsional, Longitudinal, And Lateral Vibrations of The Propeller Shaft at The Ship Stern] / Nauchnyj Zhurnal 2020. № 61. S. 121-129.
2. Nelinejnaja model' i kachestvennyj analiz svjazannyh osevyh / krutil'nyh kolebanij buril'noj kolonny [Nonlinear Model and Qualitative Analysis for Coupled Axial/Torsional Vibrations of Drill String]/ Ren F., Uang B., Chen S., i dr / Izdatel'skaja Korporacija Hindavi 2016. № 1646814. S. 1-17.
3. Ho M., Nam T., Li Zh. Samovozbuzhdajushhajasja krutil'naja vibracija v gibkoj mufte sudovoj dvigatel'noj valovoj sistemy, ispol'zujushhej kardannye valy [Self-Excited Torsional Vibration in the Flexible Coupling of a Marine Propulsion Shafting System Employing Cardan Shafts] / Zhurnal Morskoj Nauki i Tehniki 2020. № 8 S. 348-360.
4. Jelektronnyj Katalog XX Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobretenij i innovacionnyh tehnologij «ARHIMED». 5-8 aprelja 2017 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
5. Mufta : pat. 2658208 RF, MPK F16D 3/72 / M.A. Minasjan, A.M. Minasjan, J. Zeng. zajavl; 28.02.2017; opubl. 19.06.2018, Bjul. № 17. 10 s.
6. El'nik A. G., Antomoshkin A.Ju. Zashhita sudovogo oborudovanija ot udarov i vibracii s pomoshh'ju spiral'nyh trosovyh vibroizoljatorov// Sudostroenie za rubezhom. 1985. № 10, S.15 – 25.
7. Trosovaja gibkaja mufta [wire rope flexible coupling]: pat. CN 105134813 A Kitajskaja Narodnaja Respublika : MPK F16D 3/52. / Zeng Ming, Fang Xi, Zhu Xiaomei, Zhang Jinnan; zajavitel' i patentoobladatel' Voronezh. nauch.-issled. in-t svjazi. - № 201510652036.2; zajavl. 12,10,2015; opubl. 09,12,2015. – 6 s.
8. Analiz naprjazhenija i ustalosti kanata na osnove Ansys Workbench [Rope stress and fatigue analysis based on Ansys Workbench]/ U.M. Chzhu i dr. / Podemno-transportnoe oborudovanie. 2016. № 2. S. 34-38.
9. Orlov P.I. Osnovy konstruirovanija: Spravochno-metodicheskoe posobie / pod red. P.N. Uchaeva. 3-e izd. M: mashinostroenie, 1988. 544 s.
10. Fan C.F. Dinamicheskoe modelirovanie modeli struktury stal'nogo trosa [Dynamic modeling of a wire rope structure model]/ Kitajskij akademicheskij zhurnal jelektronnoe izdatel'stvo 2009. №2. S. 71-75.
11. Prauto I.; Mazlan R.B. Raschetnye, mehanicheskie i metallurgicheskie svojstva kanatov pri rastjazhenii / Vychislitel'noe Materialovedenie 2012. №56. S. 174-178.
12. Komp'juternoe modelirovanie provolochnyh prjadej i kanatov Chast' I teorija i komp'juternaja realizacija [Computer modeling of wire strands and ropes] / Stanova E. i. dr / Dostizhenija v oblasti inzhenernogo programmnoho obespechenija. 2011. №42. S. 305-315.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Минас Арменакович Минасян, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

Цзюньцзе Цзэн, аспирант, кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: tzeng817@gmail.com

Армен Минасович Минасян, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

Minas A. Minasyan, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Junjie Zeng, graduate student, Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: tzeng817@gmail.com

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of computer engineering and information technology, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

Совершенствование методики расчетного определения потерь энергии в турбинных решетках профилей

М.Ю. Левенталь¹ e-mail: Levental-30@rambler.ru, Ю.М. Погодин¹ e-mail: yu_pogodin@mail.ru,
Ю.Р. Миронов² e-mail: ur.mironov@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²ПКБ «Автоматика»

Аннотация. Представлена оценка неопределенности прогнозирования потерь энергии в решетках профилей осевых турбин. В сравнении с экспериментальными данными рассмотрены эмпирическая модель ЦИАМ и метод CFD анализа в рамках RANS модели. Геометрические и режимные параметры решеток профилей варьируются в широком диапазоне. Результаты CFD расчета отличаются существенно в зависимости от модели турбулентности. Наименьшая неопределенность получена для модели рейнольдсовых напряжений RSM. Определено выборочное стандартное относительное отклонение для анализируемой базы данных. Применительно к CFD расчету данное отклонение составило 18,6%, применительно к эмпирической модели ЦИАМ 46,4%. Разработана эмпирическая модель коррекции потерь полученных по результатам CFD анализа с моделью турбулентности RSM. Корректирующая функция включает в себя геометрические и режимные параметры решеток и особенности течения в межлопаточном канале (всего 14 параметров). Использование разработанного подхода позволило снизить неопределенность прогнозирования потерь в 2 раза. В результате работы выборочное стандартное относительное отклонение предсказания потерь для рассматриваемой базы решеток профилей составило 9,3%.

Ключевые слова: осевая турбина, решетка профилей, модель турбулентности, профильные потери, уравнение регрессии, относительное отклонение от эксперимента, методика определения расчетных потерь.

Improving the methodology for calculation of energy losses in axial turbine cascades

Mikhail Yu. Levental¹ e-mail: Levental-30@rambler.ru, Yuriy M. Pogodin¹ e-mail: yu_pogodin@mail.ru,
Yuriy R. Mironov² e-mail: ur.mironov@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, ²JSC «PKB «Avtomatika», ¹St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Estimation of the uncertainty in predicting profile losses using various models was performed. In comparison with the experimental data, empirical model of CIAM and method of CFD analysis are considered. RANS models are used. The geometric and operating parameters of the analyzed turbine cascades vary over a wide range. Turbulence models strongly influence loss prediction uncertainty. The smallest uncertainty was obtained using the RSM turbulence model. The sample standard deviation for the considered turbine cascades base was determined. The deviation for CFD analysis is 18.6%. For the empirical model of CIAM the deviation is 46.4%. The new empirical model has been created to correct the results of calculating losses according to the RANS model using the RSM turbulence model. The corrective function takes into account the influence of the geometric and operating parameters of the turbine cascades and the features of the airfoil flow (14 parameters in total). The developed approach allows reducing the uncertainty in the estimation of losses according to the RANS model by 2 times. As a result, the sample standard deviation in the prediction of losses is 9.3% for the considered turbine cascades base.

Key words: axial turbine, turbine cascade, turbulence model, profile losses, regression equation, sample standard deviation, method of estimated losses.

Введение

На сегодняшний день существует несколько подходов к определению расчетных потерь энергии в турбинных решетках профилей. Их можно подразделить следующим образом: оценка потерь на базе эмпирических моделей, определение потерь по результатам расчета невязкого обтекания профиля с расчетом пограничного слоя и численное моделирование вязкого турбулентного течения. Как правило, эмпирические модели применяются на первом этапе создания турбомшины, когда требуется оценить эффективность лопаточных венцов по общим геометрическим параметрам на определенных режимах течения. Разработано большое количество различных методик, отличающихся количеством и комбинацией геометрических и режимных параметров. Наибольшее число влияющих факторов, по мнению авторов, учтено в эмпирической методике ЦИАМ [1]. В этой методике проведено обобщение

экспериментальных данных по профильным потерям ζ_{np} в широком диапазоне скоростей потока для 220 различных решеток профилей. В качестве определяющих отобрано 13 параметров и получено уравнение регрессии в виде обобщенного полинома:

$$\zeta_{np} = \sum_{i=1}^{36} b_i z_i \quad (1)$$

где b_i - коэффициенты уравнения регрессии, z_i - комплексы, включающие геометрические и режимные параметры решеток [1]. Всего уравнение насчитывает 36 членов. Для определения коэффициентов использовано более 2200 экспериментальных точек. Однако, в силу ограничений данного подхода, в методике нет возможности учесть детали течения в межлопаточном канале, характеризующие качество обтекания профиля (например, уровень диффузорности течения по спинке и корыту, наличие

и интенсивность скачков уплотнения и отрывных течений). Многие из этих факторов можно учесть, используя следующие два подхода оценки потерь.

Расчет невязкого обтекания профиля с расчетом пограничного в настоящее время применяется на ранних стадиях создания профиля. Однако возможности этого метода ограничены из-за принимаемых допущений теории пограничного слоя.

В современной инженерной практике для анализа течения в турбомашине используются модели течения вязкой среды, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (модели RANS). Данный подход позволяет получить достаточно полную картину турбулентного течения в межлопаточном канале и спрогнозировать газодинамическую эффективность, как отдельной решетки профилей, так и проточной части в целом. Однако, как показывает практика, полученные потери энергии существенно зависят от выбранной модели турбулентности, причем отличие может достигать 100% [2]. Так же на результат оказывает влияние форма конечных объемов расчетной сетки и ее густота. Сохраняется неопределенность в оценке интегральных потерь, связанная с не точным моделированием эффектов диссипации энергии в моделях RANS.

Несмотря на интенсивное развитие средств и методов проектирования современных турбин, достоверное определение газодинамической эффективности лопаточных венцов по-прежнему остается до конца не разрешенной задачей. В целом, выборочное стандартное относительное отклонение σ (формула 2, [8]) расчетных потерь от экспериментальных до сих пор достаточно высоко и в определенной области геометрических и режимных параметров достигает 20% и более.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\zeta_{r,i}}{\zeta_{exp,i}} - 1 \right)^2}{n-1}} \quad (2)$$

где $\zeta_{r,i}$ - расчетное значение потерь энергии; $\zeta_{exp,i}$ - значение потерь, полученное по экспериментальным данным; n - количество точек в рассматриваемой базе данных.

При расчете характеристик турбин в широком диапазоне режимов погрешность определения потерь может превышать 100%. На переменных режимах структура течения в межлопаточном канале усугубляется наличием скачков уплотнения и мощных отрывов вследствие существенного увеличения углов атаки, моделирование которых с помощью RANS моделей не всегда достоверно.

Наряду с общепринятыми подходами к определению потерь, известны методы, использующие в качестве определяющих параметров характеристики эпюры распределения давлений по контуру профиля. Отдельно следует отметить научные исследования Ю.Р. Миронова [3] и С.Д. Мухиной [4]. В этих работах предложен комплекс определяющих параметров, основанный на газодинамических соотношениях (критериях газодинамической эффективности течения в канале), использующих информацию о потоке не только во входном и выходном сечениях лопаточного венца, но

и внутри межлопаточного канала. Критерии включают в себя, например, такие параметры потока, как средняя действительная скорость газа на выходе из решетки, длина зоны торможения, интенсивность уменьшения скорости на диффузорном участке, отклонение максимальной скорости в канале от скорости на выходе из решетки. Введенные комплексные параметры позволили формализовать особенности структуры течения внутри решетки и установить связь между величиной этих расчетных критериев и уровнем экспериментальных потерь. Расчет критериев может производиться на базе двумерного расчета течения невязкого сжимаемого газа в решетке профилей [4]. Отклонение расчетных потерь от экспериментальных в указанной работе около 20%. Однако, при наличии отрывных течений и высоких значениях потерь отклонение расчета от эксперимента существенно возрастает [4].

Цель настоящей работы: выполнить анализ наиболее совершенных на сегодняшний день методов определения потерь энергии в турбинных решетках профилей с использованием RANS моделей и разработать новый подход к оценке потерь с применением результатов CFD расчета и эмпирической корректирующей модели.

1. Исходные данные

Для анализа выбрано 10 наиболее характерных турбинных решеток профилей. Основными критериями выбора являлись: широкий диапазон изменения геометрических и режимных параметров решеток и наличие достоверных экспериментальных данных по коэффициентам потерь. Схема решетки приведена на рисунке 1. Геометрические параметры решеток представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунке 2 [1], [5].

Искомая корректирующая функция определяется в диапазоне приведенных скоростей на выходе из решетки λ_{2a0} от 0,5 до 1,4. Диапазон изменения геометрических параметров соответствует параметрам приведенным в таблицах 1 и 2. Относительный шаг решеток находится в диапазоне от 0,57 до 0,85; относительная толщина выходной кромки варьируется от 0,094 до 0,19; эффективный угол выхода из решетки имеет диапазон 8,9-31,3 градусов.

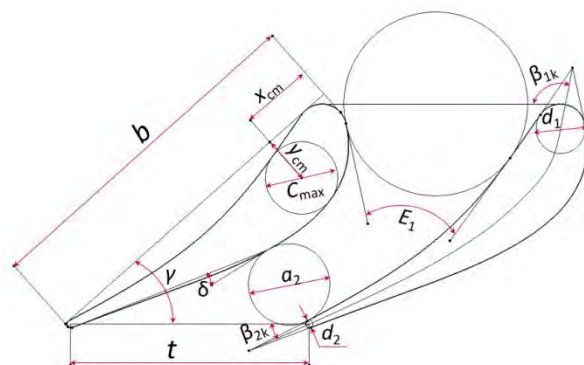


Рис. 1. Схема турбинной решетки

Таблица 1

Линейные размеры

N/N	d_1/b	C_{max}/b	t/b	x_{cm}/b	y_{cm}/b	d_2/a_2
1.	0.133	0.209	0.690	0.220	0.142	0.099
2.	0.107	0.194	0.652	0.180	0.155	0.152
3.	0.029	0.369	0.573	0.629	0.451	0.094
4.	0.079	0.261	0.840	0.320	0.368	0.142
5.	0.045	0.085	0.803	0.210	0.148	0.123
6.	0.129	0.320	0.774	0.370	0.357	0.146
7.	0.097	0.181	0.772	0.180	0.123	0.097
8.	0.127	0.195	0.799	0.320	0.335	0.160
9.	0.060	0.215	0.849	0.090	0.245	0.191
10.	0.142	0.170	0.809	0.090	0.090	0.117

Таблица 2

Угловые размеры

N/N	β_{1k}	δ	$\beta_{2эф}$	γ	$u_{кр}$	E_1
1.	100.4	9.1	19.9	41.6	4.0	48.0
2.	87.4	-0.7	16.9	36.6	3.5	47.6
3.	25.7	15.4	16.8	77.3	-2.3	0.2
4.	40.8	24.5	22.4	65.0	1.8	-15.3
5.	87.1	1.6	25.1	41.0	6.8	14.9
6.	40.4	23.1	25.0	74.0	5.4	-8.5
7.	96.8	12.2	17.6	35.1	2.0	68.7
8.	37.3	23.0	31.3	75.0	-1.7	-31.6
9.	29.3	6.8	13.7	38.9	2.6	-33.1
10.	92.9	8.9	8.9	21.5	2.8	110.2

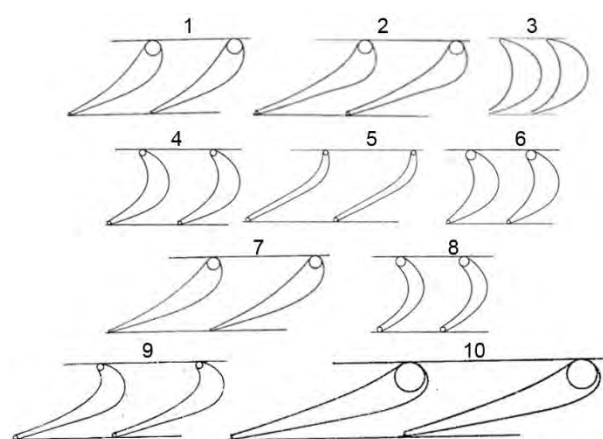


Рис. 2. Решетки профилей

В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения: d_1/b – толщина выходной кромки к хорде профиля; C_{max}/b – максимальная толщина профиля к хорде; t/b – шаг решетки к хорде профиля; x_{cm}/b – координата центра максимальной окружности вписанной в профиль по оси абсцисс отнесенная к хорде профиля; y_{cm}/b – координата центра максимальной окружности вписанной в профиль по оси ординат отнесенная к хорде профиля; d_2/a_2 –

толщина выходной кромки к величине горла решетки; β_{1k} – конструктивный угол входа в решетку (град.); $\beta_{2эф}$ – эффективный угол выхода из решетки (град.), равный арксинусу отношения величин горла к шагу решетки; δ – угол отгиба выходной кромки (град.); γ – угол установки профиля (град.); $u_{кр}$ – угол отставания выходной кромки (град.), равный разности конструктивного и эффективного углов выхода из решетки; E_1 – угол сужения межлопаточного канала на входе в решетку (град.).

Для анализа использованы результаты расчета потерь и структуры потока в данных решетках, полученные с помощью RANS модели [2]. Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS FLUENT с использованием шести различных моделей турбулентности. Использован Density-Based решатель в неявной постановке со вторым порядком аппроксимации. Была применена гибридная сетка высокой плотности с пристеночным параметром $y^+ < 1$. Входная и выходная границы расчетной области расположены на расстоянии не менее двух хорд от исследуемого профиля, интенсивность турбулентности на входе 1...2%. Информация по решеткам профилей и методика определения потерь в эксперименте получена из [1] и [5]. Выборочное стандартное относительное отклонение σ расчетных значений потерь от экспериментальных значений в зависимости от модели турбулентности приведено в таблице 3 [2]. Разброс относительных отклонений составляет 36,5...18,6% в диапазоне скоростей λ_{2ad} от 0,35 до 1,4. Наилучшие качественные и количественные результаты были получены для модели Рейнольдсовых напряжений (RSM) [2].

Таблица 3

Отклонение расчетных значений потерь от экспериментальных при использовании различных моделей турбулентности [2]

N/N	Наименование	Значение σ , %
1.	Spalart – Allmaras	36.2
2.	k-ε realizable	27.1
3.	k-ω Shear Stress Transport	22.1
4.	Transition k-kl-ω	20.3
5.	Transition SST	19.7
6.	Reynolds stress model	18.6

В данной работе в качестве поправочной функции к результатам решения задачи CFD с моделью турбулентности RSM принято отношение расчетных значений потерь к их экспериментальным значениям для соответствующей решетки.

2. Результаты

Для учета максимального числа влияющих параметров решеток при построении корректирующей функции использовались все факторы, учитываемые в эмпирической модели потерь [1] (см. параметры, приведенные в табл. 1 и 2). Дополнительно введен параметр, учитывающий особенности обтекания потоком спинки профиля лопатки. В качестве такого параметра принято отношение максимальной скорости на спинке к

осредненной скорости на выходе $\lambda_{max} / \lambda_{2a\delta}$. В разрабатываемой методике данный параметр определяется по результатам CFD расчета с использованием модели RSM. В итоге учтено влияние 14 геометрических и режимных параметров решеток.

Корректирующая функция построена в виде обобщенного полинома [6], [7] с 39 членами:

$$f_{korr} = \sum_{i=1}^{39} a_i \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_{14}) \quad (3)$$

Для определения коэффициентов корректирующей функции использован метод наименьших квадратов. Значения некоторых аргументов x_j были отмасштабированы для улучшения обусловленности системы алгебраических уравнений. Масштабировались три параметра $x_1 = \beta_{1k} / 100$, $x_6 = \beta_{2эф} / 50$, $x_{10} = \gamma / 50$.

В таблице 4 представлены значения коэффициентов a_i обобщенного полинома и вид функций $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_{14})$. Коэффициенты вычислены с использованием компьютерной программы [7].

Дополнительные функции ε_λ и ω_λ определяются также как и в эмпирической модели [1]. Функция ε_λ имеет вид:

$$\begin{cases} 1,0 \text{ при } \lambda_{2a\delta} \leq 0,69 \\ 24,9 - 84,35 \cdot \lambda_{2a\delta} + 96,06 \cdot \lambda_{2a\delta}^2 - 34,76 \cdot \lambda_{2a\delta}^3 \\ \text{при } 0,7 \leq \lambda_{2a\delta} \leq 1,049 \\ -1954,578 + 6414,496 \cdot \lambda_{2a\delta} - 7832,094 \cdot \lambda_{2a\delta}^2 + \\ + 4222,77 \cdot \lambda_{2a\delta}^3 - 849,149 \cdot \lambda_{2a\delta}^4 \text{ при } \lambda_{2a\delta} \geq 1,05 \end{cases} \quad (4)$$

Значение функции ω_λ определяется следующим образом:

$$\omega_\lambda = \frac{1}{2} [\sin((\lambda_{2a\delta} - 1,15) \cdot 2\pi) + 1] \quad (5)$$

Для получения откорректированного значения потерь на определенном режиме необходимо величину потерь, вычисленную по CFD расчету разделить на значение, полученное по корректирующей функции.

Таблица 4
Коэффициенты и вид функции уравнения

N/N	Значение Коэффициента a_i	Вид Функций $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_{14})$
1	2.161401360	β_{1k}
2	0.503230935	$\lambda_{2a\delta}$
3	-9.447763835	β_{1k}^2
4	0.261756652	$\beta_{1k} \cdot \delta$
5	3.042593261	$\beta_{1k} \cdot d_1$
6	-4.690215244	$\beta_{1k} \cdot \lambda_{2a\delta}$
7	2.100202911	$\beta_{1k} \cdot \lambda_{2a\delta}^2$
8	-0.013220145	$\beta_{2эф} \cdot \delta$
9	0.084940756	$\beta_{2эф} \cdot \gamma$
10	0.015022863	$\beta_{2эф} \cdot u_{кр}$
11	-67.952683149	C_{max}^2
12	1.098345106	$C_{max} \cdot t$
13	-44.003786209	$C_{max} \cdot d_1$
14	26.571133310	$C_{max} \cdot E_1$
15	1.140248966	$C_{max} \cdot \lambda_{2a\delta}$
16	-1.433557243	t^2
17	25.531516272	$t \cdot d_1$
18	3.807120585	$t \cdot \gamma$
19	-1.696124747	$t \cdot E_1$
20	-0.014223042	$t \cdot \lambda_{2a\delta}^2$
21	-2.176385844	$\delta \cdot d_1$
22	0.730942750	$\delta \cdot x_{cm}$
23	130.552087828	$d_1 \cdot y_{cm}$
24	22.357884538	$x_{cm} \cdot E_1$
25	-1.755023869	$x_{cm} \cdot \lambda_{2a\delta}^2$
26	-25.009272511	$y_{cm} \cdot E_1$
27	-36.309374181	$\beta_{1k} \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
28	0.672175735	$\beta_{2эф} \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
29	-1.989325619	$\delta \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
30	23.253202966	$\beta_{1k}^2 \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
31	-0.789246422	$\beta_{1k} \cdot \beta_{2эф} \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
32	1.604384406	$\beta_{1k} \cdot \delta \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
33	0.033826902	$\delta^2 \cdot d_2 \cdot \varepsilon_\lambda$
34	0.007345955	$\beta_{2эф}^2 \cdot d_2 \cdot \omega_\lambda$
35	0.002787195	$\delta^2 \cdot d_2 \cdot \omega_\lambda$
36	-1.664623197	$\lambda_{max} / \lambda_{2a\delta}$
37	1.513353318	$\lambda_{max} \cdot \varepsilon_\lambda / \lambda_{2a\delta}$
38	-0.651780353	$\lambda_{max} \cdot \omega_\lambda / \lambda_{2a\delta}$
39	2.495466024	1

По результатам расчета потерь энергии по различным методикам были определены выборочные стандартные относительные отклонения расчетных значений потерь от экспериментальных. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Отклонение расчетных значений потерь от экспериментальных для различных методик

N/N	Наименование	Значение σ , %
1.	CFD, модель турбулентности RSM	18.6
2.	Эмпирическая модель ЦИАМ.	46.4
3.	Расчет с использованием данные CFD анализа и эмпирической корректирующей функции	9.3

Выводы

- Выполнено сравнение результатов расчета потерь с помощью эмпирической модели определения потерь ЦИАМ и с использованием CFD анализа (модель турбулентности RSM). Выборочное стандартное относительное отклонение расчетных потерь от экспериментальных данных составляет 46.4 и 18.6% соответственно для рассмотренной базы решеток турбинных профилей. Точность оценки потерь по данным CFD анализа выше, чем по одной из лучших из известных эмпирических моделей.

- Построена корректирующая эмпирическая модель, позволяющая уточнить расчетные значения потерь в решетках профилей, полученные по данным CFD анализа с моделью турбулентности RSM. Корректирующая функция учитывает влияние геометрических и режимных параметров решеток, а также газодинамический фактор, характеризующий качество обтекания профиля, который можно определить по данным CFD анализа.

Литература

1. Венедиктов В. Д., Грановский А.В., Карелин А.М., Колесов А.Н., Мухтаров М.Х. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. Москва, ЦИАМ, 1990, 393с.
2. Левенталь М.Ю., Тихомиров Б.А., Миронов Ю.Р. Использование CFD анализа для определения потерь энергии в решетках профилей осевых турбин. Москва, Авиационная промышленность, 2018, N 1, стр.20-24.
3. Миронов Ю. Р. Опыт профилирования охлаждаемой сопловой решетки высокочастотной турбины. Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинных газотурбинных двигателях. Казань, КАИ, 1989, стр.56-60.
4. Мухина С.Д. Разработка метода расчета профильных потерь в плоских решётках профилей. Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы исследований и разработок по созданию силовых и энергетических установок XXI века». Москва: ЦИАМ, 2000г.
5. Дейч М.Е., Самойлович Г.С. Основы аэродинамики осевых турбомашин. М., Машиностроение, 1959.
6. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М.: Наука, 1967, 368с.
7. Погодина М.Ю. Математическое описание внешних характеристик газотурбинного двигателя. Тезисы доклада. Третья Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». СПб, СПбГМТУ, 13-14 февраля 2014, стр. 107-108.
8. ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство ИСО. МЭК 98-3:2008.

References

1. Venedictov V.D., Granovskij A.V., Karelin A.M., Kolesov A.N., Mukhtarov M.Kh. Atlas Jekspierimental'nykh kharakteristik ploskikh reshetok okhlazhdaemykh gazovykh turbin [Atlas of experimental characteristics of turbine cascades of cooled gas turbines]. M., CIAM, 1990, 393s.
2. Levental M.Yu., Tichomirov B.A., Mironov Yu.R. Ispol'zovanie CFD analiza dlya opredeleniya poter' energii v reshetkakh profiley osevykh turbin [Use of CFD analysis for prediction of losses in axial turbine cascade]. Moskva, Aviatsionnaya promyshlennost', 2018, N 1, s.20-24
3. Mironov Yu. R. Opyt profilirovaniya okhlazhdaemoy soplovoy reshetki vysokoperepadnoy turbiny [Experience of profiling a turbine cascade for cooled nozzle of a high-pressure turbine]. Rabochie protsessy v okhlazhdaemykh turbomashinakh gazoturbinnnykh dvigateley. Kazan', KAI, 1989, s.56-60.
4. Mukhina S.D. Razrabotka metoda rascheta profil'nykh poter' v ploskikh reshetkakh profiley [Development of a method for calculating profile losses in turbine cascade]. Vseros-siyskaya konferentsiya molodykh uchenykh «Problemy issledovaniy i razrabotok po sozdaniyu silovykh i energeticheskikh ustanovok XXI veka», Moskva, CIAM, 2000.
5. Dejch M.E., Samojlovich G.S. Osnovy aerodinamiki osevykh turbomashin. M., Mashinostroenie, 1959.
6. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. Chislennye metody analiza. M.: Nauka, 1967, 368s.
7. Pogodina M.Yu. Matematicheskoe opisanie vneshnikh kharakteristik gazoturbinnogo dvigatelya [Mathematical description of the external operating mode parameters of a gas turbine engine]. Tezisy doklada. Tret'ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy morskoy energetiki». SPb, SPbGMTU, 13-14 fevralya, 2014, s.107-108.
8. GOST R 54500.3-2011. Rukovodstvo ISO. MEK 98-3:2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Юрьевич Левенталь, магистр техники и технологий, аспирант, Кафедра судовых турбин и турбинных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Levental-30@rambler.ru..

Юрий Михайлович Погодин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых турбин и турбинных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: yu_pogodin@mail.ru.

Юрий Рафаилович Миронов, кандидат технических наук, АО «ПКБ «Автоматика», 198097, Санкт-Петербург, Проспект Стачек 47, e-mail: ur.mironov@gmail.com

Mikhail Yu. Levental, MSc. (Eng), The Postgraduate student, Department of Ship Turbines and Turbine Units, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: Levental-30@rambler.ru..

Yuriy M. Pogodin, Ph.D. (Eng), The Associate Profess, The Associate Profess of the Department of Ship Turbines and Turbine Units, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: yu_pogodin@mail.ru.

Yuriy R. Mironov, Ph.D. (Eng), JSC «ПКБ «Avtomatika», Prospekt Stachek, 47, St. Petersburg, 198097, Russian Federation, e-mail: ur.mironov@gmail.com

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 537.84

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.041>

Численное моделирование электромагнитного поля, индуцированного колебательным движением заряженного шара

С.Ю. Маламанов¹ e-mail: stevmal@mail.ru, В.А. Павловский² e-mail: stevmal@mail.ru

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Современные вычислительные средства с помощью новейших компьютерных технологий дают возможность производить моделирование наукоёмких задач в самых разных сферах деятельности. Новые возможности, позволяют ставить и решать многие комплексные научные и технические задачи морской гидрофизики, среди которых особенно актуальны в настоящее время следующие: создание аппаратуры для изучения и измерения электрического и магнитного полей в воде; исследование электрических явлений в морской среде для определения их связи с другими физическими процессами; изучение магнитогидродинамических процессов, возникающих из-за движения морской воды в геомагнитном поле Земли и многие другие. Определённые задачи требуют физически адекватного описания движения твёрдого тела, как в жидкой среде, так и на границе раздела сред, например, «газ–жидкость». Решение подобных задач стало возможным с помощью современных вычислительных комплексов. При этом следует иметь в виду, что сложный характер взаимодействия гидродинамического и электромагнитного полей обуславливает необходимость рассмотрения достаточно упрощённых моделей, описывающих основные закономерности изучаемых явлений.

Предлагаемая статья является продолжением работы [1]. Более подробно рассмотрено индуцируемое электромагнитное поле, вызванное колебаниями заряженного шара в приповерхностном слое жидкости. Подчёркнём, что рассматривается моделирование не только магнитного, но и электрического поля. Помимо этого обсуждаются возможные упрощения, которые используются при численном моделировании индуцированного магнитного поля.

Для расчета параметров электромагнитного поля решалась система нестационарных уравнений магнитной гидродинамики, реализованная в вычислительном комплексе ANSYS.CFX.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, скорость потока, магнитное поле, вынужденные колебания, математическая модель.

Numerical simulation of the electromagnetic field induced by the oscillatory motion of a charged ball

Stepan Y. Malamanov¹ e-mail: stevmal@mail.ru, Valery A. Pavlovsky² e-mail: stevmal@mail.ru

¹ Baltic State Technical University "VOENMEKH", ² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Modern computing facilities with the help of the latest computer technologies make it possible to simulate science-intensive tasks in a variety of fields of activity. New opportunities make it possible to pose and solve many complex scientific and technical problems of marine hydrophysics, among which the following are especially relevant at present: the creation of equipment for the study and measurement of electric and magnetic fields in water; study of electrical phenomena in the marine environment to determine their relationship with other physical processes; the study of magnetohydrodynamic processes arising from the movement of sea water in the geomagnetic field of the Earth and many others. Certain problems require a physically adequate description of the motion of a solid, both in a liquid medium and at the interface between media, for example, "gas-liquid". The solution of such problems has become possible with the help of modern computing systems. It should be borne in mind that the complex nature of the interaction of the hydrodynamic and electromagnetic fields necessitates the consideration of rather simplified models that describe the basic laws of the studied phenomena.

This article is a continuation of work [1]. The induced electromagnetic field caused by vibrations of a charged ball in the near-surface layer of a liquid is considered in more detail. We emphasize that we are considering modeling not only the magnetic, but also the electric field. In addition, possible simplifications are discussed that are used in the numerical simulation of the induced magnetic field.

To calculate the parameters of the electromagnetic field, a system of non-stationary equations of magnetohydrodynamics was solved, implemented in the ANSYS.CFX computer complex.

Key words: numerical modeling, conducting fluid, flow velocity, magnetic field, forced vibrations, mathematical model.

Моделирование колебаний шара

Часть расчётной области, представляющая собой куб, показана на рисунке 1.

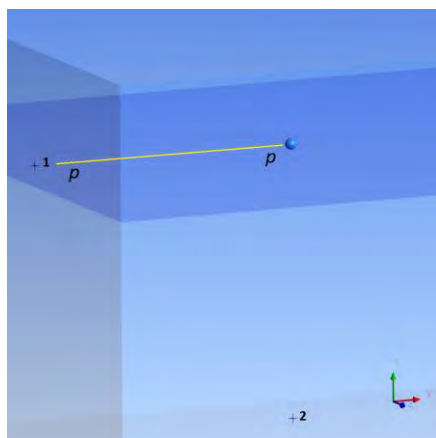


Рис. 1. Схема расчётной области

На нём виден шар (его диаметр $D = 0.5$ м), свободная поверхность и две точки с номерами 1 и 2. Одна из точек расположена на вертикальной оси на расстоянии 12 метров вниз от положения равновесия колеблющегося шара, а другая точка – на таком же расстоянии на горизонтальной прямой, перпендикулярной оси Y.

Шар плотностью немного меньшей (на 3 %) плотности воды погружается в воду, где он под действием силы тяжести и силы Архимеда совершает затухающие колебания в приповерхностном слое. Вызванное этим движение присоединённой массы жидкости можно рассматривать как гидродинамический источник. Данное обстоятельство иллюстрирует рисунок 2, на котором по оси ординат отложена высота центра масс шара, отсчитываемая от дна, а по оси абсцисс – время.

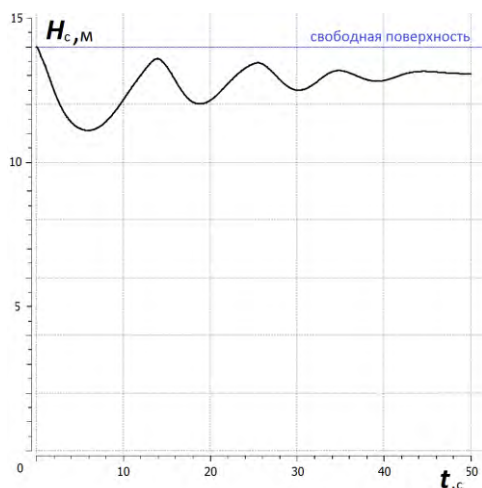


Рис. 2. Изменение положения центра масс шара в случае затухающих колебаний

Из анализа рисунка видно, что со временем шар приходит в состояние равновесия, расположенное на некоторой глубине, что адекватно физике рассматриваемого явления.

Моделирование колебаний заряженного шара

После решения чисто гидродинамической задачи, рассматриваем колебательное движение заряженного шара в тех же условиях. Эти колебания генерируют в окружающем пространстве электромагнитное поле [3,4]. Моделирование осуществлялось на основе решения нестационарных уравнений магнитной гидродинамики. Потенциал шара поддерживался постоянным 200 В, коэффициент электропроводности морской воды принимался 5 См/м.

Индукционное магнитное поле является следствием движения заряженного шара. Для пояснения этого, обратимся к рисунку 3.

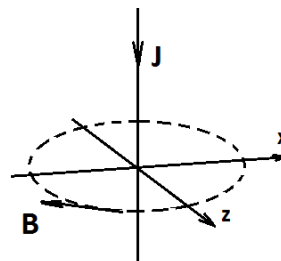


Рис. 3. Магнитное поле прямолинейного тока

На нём схематически показан бесконечный прямой провод, по которому течёт постоянный ток J . Как известно [5], он порождает магнитное поле, линии индукции которого представляют собой концентрические окружности в плоскостях, перпендикулярных проводу. При этом модуль индукции одинаков во всех точках выделенной окружности – пунктирная линия. Наблюдаемое колебательное движение заряженного тела «можно» рассматривать как переменный ток. Именно этот ток и вызывает изменение электромагнитной «обстановки» в окружающем пространстве.

В данной работе рассмотрено изменение индуцированного электромагнитного поля в пространстве в различные моменты времени.

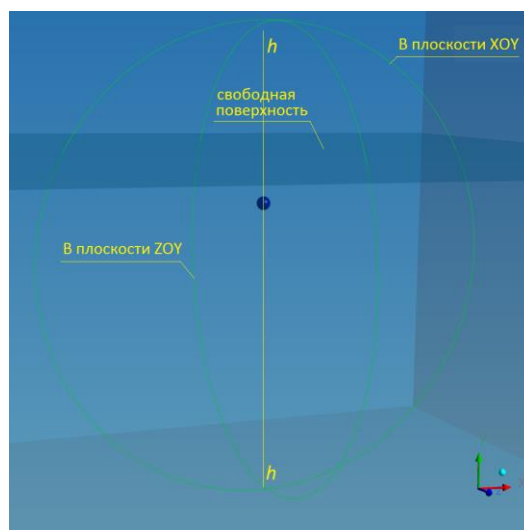


Рис. 4. Вспомогательные линии, вдоль которых строятся изменения характеристик электромагнитного поля

Для выяснения вида распределения характеристик электромагнитного поля необходимо

сделать построение вспомогательных линий, вдоль которых и будут отображены эти распределения. На рисунке 4 показаны две окружности, лежащие в плоскостях симметрии XOY и ZOY , а также вертикальная прямая hh , являющаяся осью симметрии шара. Вдоль этой прямой, в момент времени $t = 18$ с, на рисунке 5 показано распределение величины индуцированного магнитного поля.

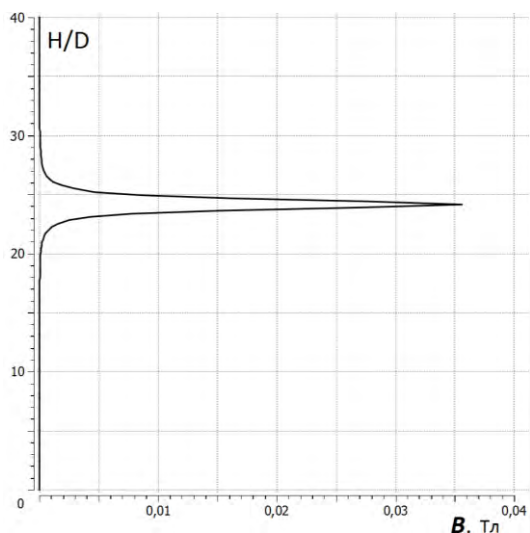


Рис. 5. Изменение индуцированного магнитного поля

По горизонтальной оси отложена величина индукции вторичного (индуцированного) магнитного поля, а по вертикальной оси – относительная высота расчётной области, отсчитываемая от дна, D – диаметр шара. Интересно заметить, что похожим образом с индуцируемым магнитным полем ведет себя и индуцированное электрическое поле (в тот же момент времени). Это хорошо видно на рисунке 6:

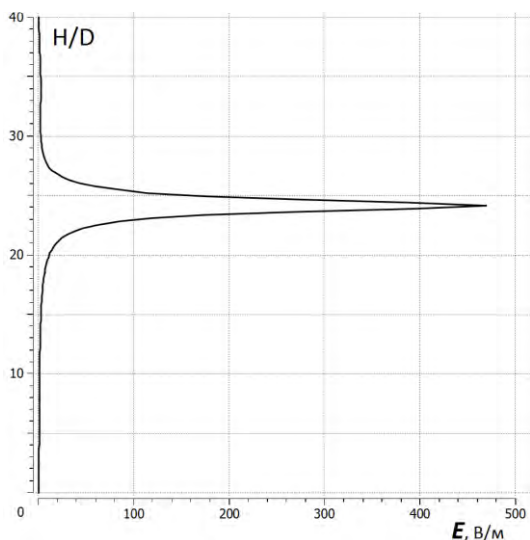


Рис. 6. Изменение индуцированного электрического поля

Распределения кривых, приведенные на рисунках 5 и 6, имеют вид диаграмм направленности. Для сравнения на рисунке 7а и 7б показана типичная диаграмма направленности диполя электрический момент, которого $\vec{p}(t)$ гармонически меняется со временем.

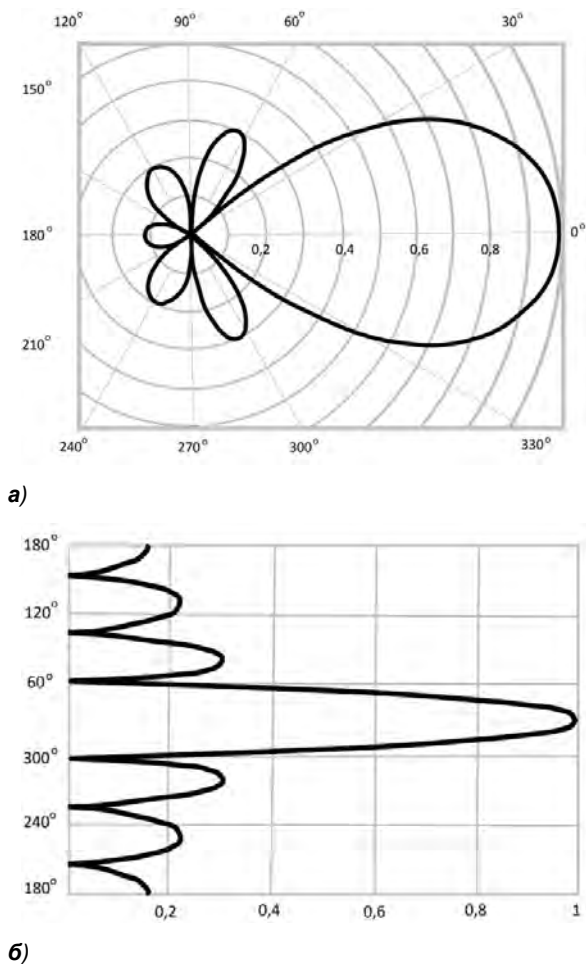


Рис. 7. Диаграмма направленности колеблющегося диполя.

Напомним, что диаграмма направленности – это зависимость характеристик поля (напряженности электрического и индукции магнитного), создаваемого излучателем на достаточно большом расстоянии, от углов наблюдения в пространстве.

Для выяснения вида распределения характеристик электромагнитного поля в пространстве в зависимости от углов наблюдения и были построены вспомогательные окружности, показанные на рисунке 4. На рисунке 8 показано распределение вдоль окружности, лежащей в плоскости XOY , в момент времени $t = 18$ с, величины индуцированного магнитного поля – по вертикальной оси (в логарифмическом масштабе); по горизонтальной оси отложены углы наблюдения.

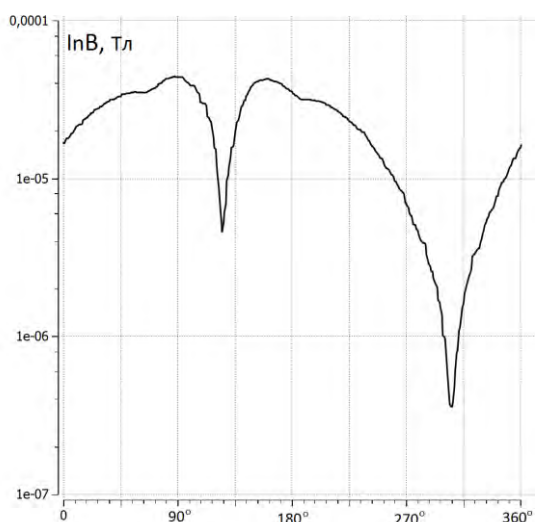


Рис. 8. Изменение индуцированного магнитного поля вдоль окружности, лежащей в плоскости XOY .

Аналогичный график, построенный вдоль окружности, лежащей в плоскости ZOY , показан на рисунке 9.

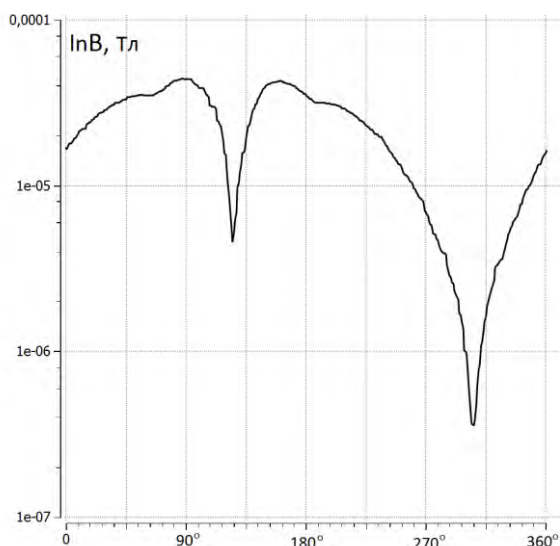


Рис. 9. Изменение индуцированного магнитного поля вдоль окружности, лежащей в плоскости ZOY .

Обращает на себя внимание наличие двух минимумов распределения, сдвинутых друг относительно друга на 180° . Практическое «совпадение» графиков на этих рисунках свидетельствует о симметрии распределения величины индуцируемого магнитного поля в пространстве. Это обстоятельство иллюстрирует рисунок 10, на котором представлена изоповерхность величины индуцированного магнитного поля в момент времени $t = 18$ с.

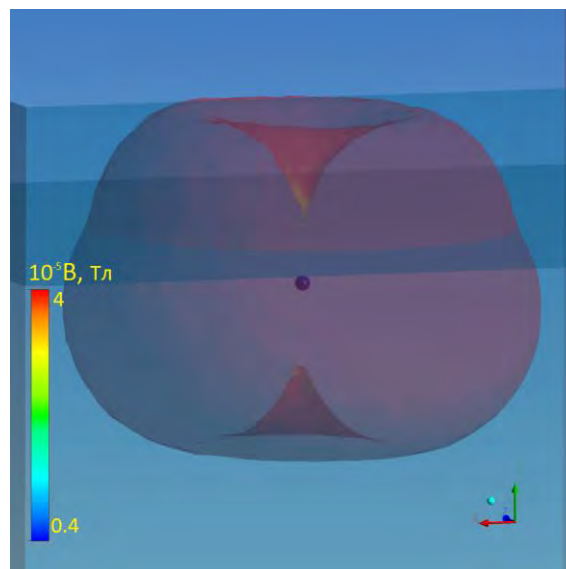


Рис. 10. Изоповерхность величины индуцированного магнитного поля.

На указанной поверхности хорошо видны две «воронки» с единой осью симметрии, обращённые узкими частями друг к другу. Эти «воронки» соответствуют значительному уменьшению величины магнитного поля на прямой, вдоль которой совершает колебания шар. Этот факт находит в полном соответствии с классическими представлениями о распределении в пространстве магнитного поля прямолинейного тока – см. рисунок 3. Как хорошо известно [5], в направлении тока индукция магнитного поля равна нулю. В нашем случае, в направлении колебаний шара, индукция магнитного поля нулю не равна, ввиду конечности поперечных размеров заряженного тела. Это и приводит к «образованию воронок». Углы (отложенные по оси абсцисс на рисунках 8 и 9), соответствующие минимумам, отстоят друг относительно друга на 180° , то есть «определяют» единую прямую линию – hh .

Моделирование колебаний заряженного шара во внешнем магнитном поле

При проведении данного моделирования представляет определённый интерес сравнение величины генерируемого магнитного поля и электрического поля с какими-либо характерными значениями. В качестве таких «эталонов» удобно рассматривать среднюю величину индукции геомагнитного и напряжённости электрического поля Земли, равные соответственно $B_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл и $E_0 = 100$ В/м. В этой связи был проведён аналогичный расчёт с заданным вертикальным (вдоль оси Y) внешним магнитным полем, индукция, которого равна B_0 . Распределение относительной величины индукции генерируемого магнитного поля в момент времени $t = 18$ с показано на рисунке 11.

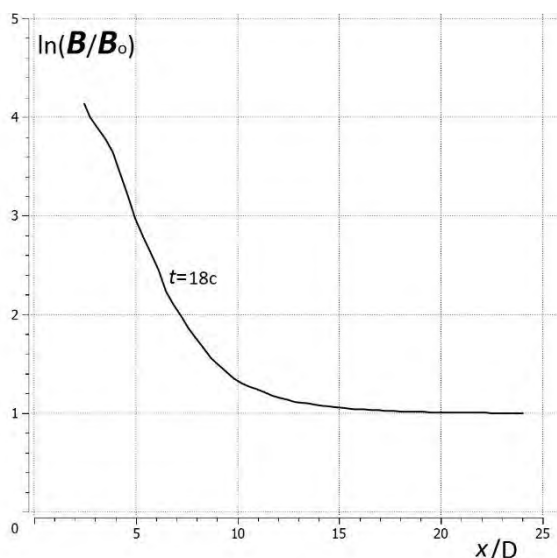


Рис. 11. Распределение относительной величины генерируемого магнитного поля

По оси абсцисс отложено относительное расстояние вдоль прямой pp (см. рисунок 1), а по оси ординат – относительная величина генерируемого магнитного поля в логарифмическом масштабе. Видно, что индуцируемое магнитное поле может значительно превосходить геомагнитное поле Земли. Помимо этого сравним «пространственное» распределение величины индуцируемого магнитного и электрического полей в разные моменты времени, представленные на рисунках 12 и 13. На них по горизонтальной оси отложена относительная величина индуцируемого поля, а по вертикальной оси – относительная высота расчётной области, отсчитываемая от дна.

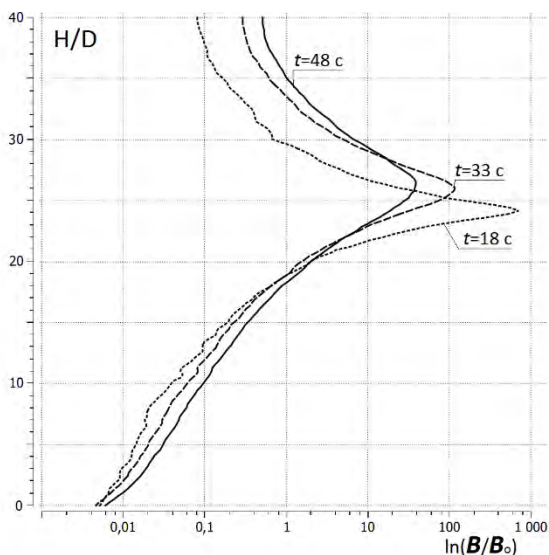


Рис. 12. Распределение относительной величины генерируемого магнитного поля в разные моменты времени.

Величина индуцируемого магнитного поля представлена в логарифмическом масштабе.

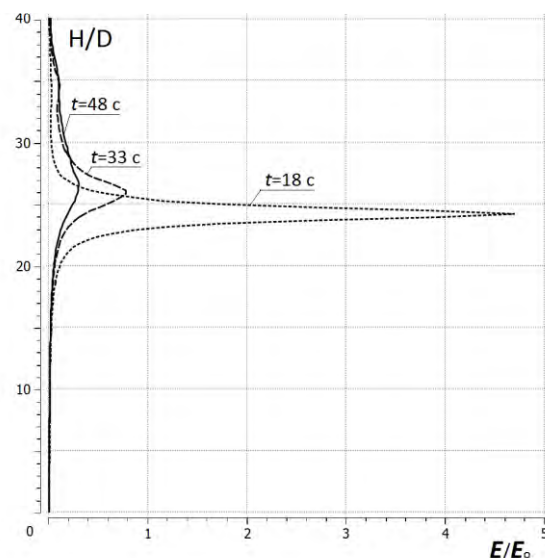


Рис. 13. Распределение относительной величины генерируемого электрического поля в разные моменты времени.

Стоит отметить одну сугубо техническую деталь. Анализ поведения распределений в разные моменты времени представленных в логарифмическом масштабе, позволяет «уловить» тенденцию в поведении изучаемой величины. В то же время найти определённую тенденцию в обычных координатах труднее, если вообще возможно, как пример – рисунок 13. Если относительную величину индуцируемого электрического поля представить в логарифмическом масштабе, то график станет более информативным. На рисунке 14 отчётливо видно перестроение электрического поля во времени:

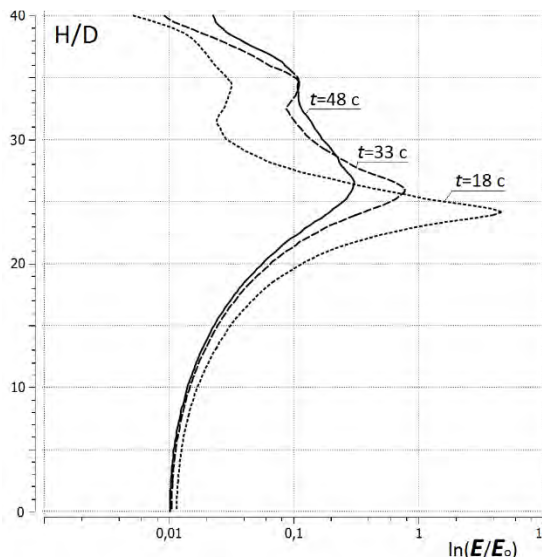


Рис. 14. Распределение относительной величины генерируемого электрического поля в разные моменты времени.

Как уже было указано, подобного рода задачи свойственны морской электродинамике, где постоянным магнитным полем служит геомагнитное поле Земли. При этом возникают определенные упрощения в уравнении переноса вектора напряженности магнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_m \sigma} \Delta \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (1)$$

Рассмотрим их, разлагая вектор напряженности магнитного поля на две составляющие: $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$, где $\mathbf{B}_0 = const$.

Уравнение (1) при этом примет вид:

$$\frac{\partial (\mathbf{B}_0 + \mathbf{b})}{\partial t} = \frac{1}{Re_m} \Delta (\mathbf{B}_0 + \mathbf{b}) + \nabla \times (\mathbf{u} \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{b})).$$

Здесь Re_m магнитное число Рейнольдса [2]. Полагая, что слагаемые в правой части одного порядка, получим:

$$\frac{1}{Re_m} \Delta \mathbf{b} \sim \nabla \times (\mathbf{u} \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{b})),$$

и, следовательно, $\mathbf{b} \sim Re_m (\mathbf{B}_0 + \mathbf{b})$.

Таким образом:

$$\mathbf{b} \sim \frac{Re_m}{1 - Re_m} \mathbf{B}_0 \Big|_{Re_m < 1} \approx Re_m \mathbf{B}_0.$$

Для задач морской гидрофизики магнитное число Рейнольдса есть величина малая (в данной задаче – $Re_m = 8 \cdot 10^{-5}$), поэтому индуцированное поле \mathbf{b} значительно меньше внешнего поля \mathbf{B}_0 . Исходя из этого, уравнение переноса вектора напряженности индуцированного магнитного поля в безразмерном виде можно представить так:

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = \frac{1}{Re_m} \Delta \mathbf{b} + \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}_0). \quad (2)$$

Уравнение движения

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

при этом также упрощается:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \sigma (\mathbf{u} \times \mathbf{B}_0) \times \mathbf{B}_0. \quad (3)$$

где $\mathbf{B}_0(0, B_0, 0)$ индукция геомагнитного поля Земли. Именно в такой форме уравнениями пользуются многие исследователи, при расчёте и моделированию индуцированных полей. Анализ этих уравнений позволяет сделать важное заключение: при заданном внешнем постоянном магнитном поле, происходит «расщепление» системы уравнений – уравнение движения (3) можно решать отдельно от уравнения переноса вектора индуцированного магнитного поля (2). При этом для решения последнего необходимо знать распределение вектора скорости в пространстве. Этим существенным упрощением активно пользуются при проведении моделирования гео- и гидрофизических процессов в океане.

Заключение

Проведённые расчёты показали, что колебательное движение заряженного шара вызывает всплеск индуцированного электромагнитного поля, значительно превосходящее «фоновое» электромагнитное поле Земли.

Кроме того, пренебрежение индуцированным магнитным полем по сравнению с геомагнитным полем Земли, как внешним, - довольно сильное допущение, которое требует дополнительного анализа и обоснованности. В этой связи применение комплекса ANSYS, как современной технологии физико-математического моделирования, наделенного новыми возможностями по расчёту магнитогидродинамических течений, позволяет ставить и решать многие комплексные научные и технические задачи морской гидрофизики в достаточно общей постановке.

Литература

1. Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Численное моделирование магнитного поля, индуцированного колебательным движением заряженного шара // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №4(50), т.3 2020, С.169 – 176
2. Кирко И.М., Кирко Г.Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2009. – 632с.
3. Жмур В.В. О вариациях электромагнитных полей, индуцированных океаническими движениями синоптического масштаба // Геомагн. и аэронаом.1980. XX. №4. – С 693-700.
4. Савченко В.Н., Смагин В.П., Фонарев Г.А. Вопросы морской электродинамики: Монография. – Владивосток: Изд-во ВГУЭиС, 1999. – 208 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. – 11-е изд., исп. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.

References

1. Malamanov S.YU., Pavlovskiy V.A. Chislennoye modelirovaniye magnitnogo polya, indutsirovannogo kolebatel'nym dvizheniyem zaryazhennogo shara [Numerical modeling of the magnetic field induced by the oscillatory motion of a charged ball] // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2020. №4(50), t.3 2020, S.169 – 176.
2. 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 issledovaniy, 2009. – 632 s.
3. Zhmur V.V. O variatsiyakh elektromagnitnykh poley, indutsirovannykh okeanicheskimi dvizheniyami sinopticheskogo masshtaba [Variations of electromagnetic fields induced by oceanic motions of synoptic scale] // Geomagn. i aeronom.1980. XX. №4. – S 693-700.
4. Savchenko V.N., Smagin V.P., Fonarev G.A. Voprosy morskoy elektrodinamik [Problems of Marine Electrodynamics]: Monografiya. – Vladi-vostok: Izd-vo VGUEiS, 1999. – 208 s.
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.

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

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

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

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

Поступила в редакцию:

Принята к публикации:

УДК 623.82

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.042>

Методика практического расчета телевизионных коммуникаций подводных аппаратов

В.Л. Мартынов^{1,2}, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru Ю.Л. Сиек¹, e-mail: siek@mail.ruА.Н. Борисов¹, e-mail: bor_fond93@mail.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация В статье обосновывается и предлагается для практического применения методика расчёта подводных телевизионных коммуникаций, апробированная при проведении испытаний отечественных подводных аппаратов на морских акваториях Белого и Баренцева морей. Последовательно проводится расчет освещенности толщи воды между осветителем и объектом наблюдения; определяется суммарная освещенность на входе объектива телевизионной камеры, создаваемая отраженным от объекта светом и помехой обратного рассеяния; рассчитывается контраст белых и черных объектов. В заключении показан расчет изменения пороговой чувствительности камеры в зависимости от дальности наблюдения. Представленная методика может использоваться при проектировании систем технического зрения обитаемых и необитаемых подводных аппаратов для получения данных о предполагаемых дальностях наблюдения объектов с различными коэффициентами отражения с заданными параметрами прожекторного осветителя.

Ключевые слова: подводные робототехнические комплексы, методика, система технического зрения, освещённость, подводный световой прибор, телекамера.

Method for practical calculation of underwater vehicle's television communications

Viktor L. Martynov^{1,2} e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru, Yuriy L. Siek¹ e-mail: siek@mail.ru,Aleksandr N. Borisov¹ e-mail: bor_fond93@mail.ru¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article proposes a technique for calculating underwater television communications, which was confirmed during tests of domestic underwater vehicles in the waters of the White and Barents Seas. First, the illumination of the water between the illuminator and the object of observation is calculated; then the total illumination at the entrance of the TV camera lens, created by the light reflected from the object and the backscattering interference, is determined; and finally, the contrast of white and black objects is calculated. In conclusion, the calculation of the change in the threshold sensitivity of the camera depending on the observation range is shown. The presented technique can be used in the design of computer vision systems of crewed and unmanned underwater vehicles to obtain data on the estimated observation ranges of objects with different reflection coefficients and with the specified parameters of the searchlight illuminator.

Key words: underwater robotic systems, method, computer vision system, illumination, underwater searchlight, TV camera.

Введение

Эффективное проведение научных исследований на морских глубинах обеспечивается с помощью бортовых источников добывания информации, размещаемых на подводных аппаратах, называемых иногда робототехническими комплексами. Для повышения эффективности проведения поисковых или исследовательских операций источники добывания информации функционируют, как правило, в различных физических полях. Среди этих источников особая роль отводится телевизионным коммуникациям, роль которых выполняет система технического зрения [1, 2, 3, 4, 5]. В её состав входят телевизионная подсистема и подсистема наружного освещения. Функцию подсветки объектов поиска на глубине выполняют, как правило, прожекторные осветители. Система технического зрения выполняет функции телевизионных коммуникаций, обеспечивая распознавание и идентификацию исследуемых объектов на рабочих глубинах.

При проектировании подводных робототехнических комплексов с учётом возлагаемых на неё задач следует создавать системы технического зрения с требуемыми

характеристиками. Предлагаемая методика обеспечивает практический расчёт для получения данных о предполагаемых дальностях наблюдения объектов с различными коэффициентами отражения.

1. Расчет освещенности толщи воды

В первой части методики проводится расчет освещенности толщи воды $E_1(D)$ между осветителем, входящим в состав подводной системы видения, и освещаемым объектом наблюдения.

Расчет выполняется по следующей формуле [6]:

$$E_1(D) = \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{\text{упл}} \cdot e^{-k_d \cdot c \cdot D}}{D^2} \quad (1)$$

где: $E_1(D)$ – освещенность толщи воды между светильником и объектом наблюдения;

I – сила света светильника (осветителя).

Для расчетов примем:

$I = 12000$ кд – техническая характеристика прожекторного осветителя «Коралл»;

$\tau_{\text{упл}}$ – коэффициент потерь в двух иллюминаторах (светильник и телекамера).

Для расчетов примем: $\tau_{\text{илл}} = 0,96$ [2, 3];

- K_D – коэффициент достоверности.

Для расчетов:

$K_D = 0,5$ – значение коэффициента

достоверности получено статистическим путем при проведении испытаний системы технического зрения в ФГУП «НИИТ» [7];

- D – текущее расстояние, на которое распространяется свет;

- ε показатель ослабления водной среды. Для

расчетов примем: $\varepsilon = 0,25 \text{ м}^{-1}$.

График зависимости освещенности толщи воды прожекторным осветителем от дальности объекта наблюдения представлен на рисунке 1. Для удобства построения ось ординат выполнена в логарифмическом масштабе.

Из графика следует, что величина освещенности равномерно убывает с увеличением расстояния до объекта наблюдения. Уже на расстоянии до него, равном 21 м, величина освещенности не превышает 1 лк.

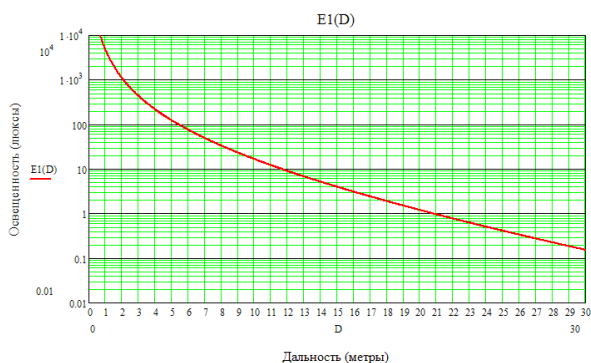


Рис. 1. График 1 - Зависимость освещенности толщи воды прожекторным осветителем от дальности объекта наблюдения

2. Расчет освещенности, создаваемой помехой обратного рассеяния

Во второй части методики рассчитывается освещенность, создаваемая помехой обратного рассеяния [8] (ПОР) на входе объектива телевизионной камеры $E_2(D)$.

Для решения этой задачи воспользуемся рисунком 2.

Расчет ПОР проводят отдельно как по осевым лучам, так и по граничным. Для упрощения рассчитаем освещенность помехи обратного рассеяния, создаваемой одним из граничных лучей светильника, обозначенного красным цветом (отрезок АВ). В соответствии с направлением как поля засветки осветителя, так и поля зрения ТВ приемника, луч от осветителя (из точки А) к границе поля зрения телевизионной камеры (к точке В) пройдет 9 м (рисунок 2).

Это расстояние отсчитывается на графике 1 по оси абсцисс. От нее проводим вертикаль до пересечения с линией графика, и на оси ординат выбирается освещенность $E(\Delta D)$ в точке В, составляющая 24 люкса. В итоге получаем график за

№ 2, показанный на рисунке 3, на котором представлены описанные выше построения.

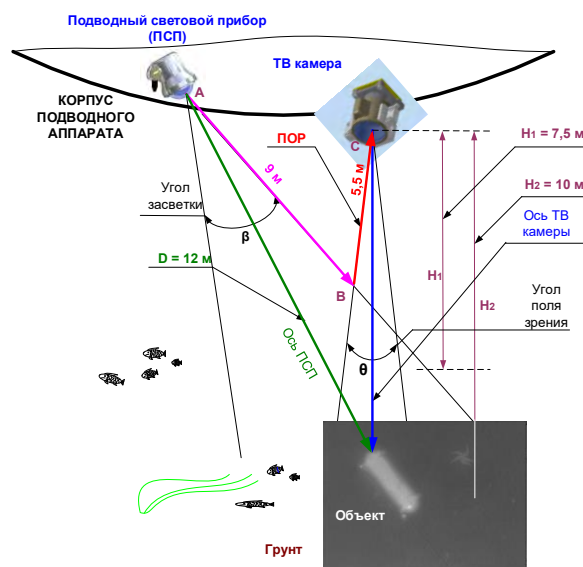


Рис. 2. Расположение осветителя и телевизионной (ТВ) камеры на подводном аппарате при проведении подводного поиска

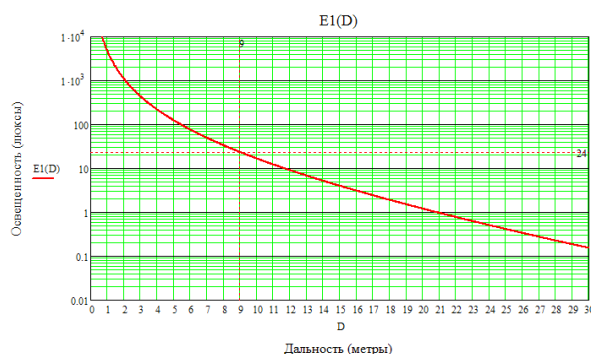


Рис. 3. График 2 - Определение освещенности $E(\Delta D)$

Воспользуемся графиком № 2 для графического построения освещенности ПОР. Освещенность ПОР на входе телевизионной камеры рассчитывается по формуле [6]:

$$E_2(D) = 0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1} \quad (2)$$

где:

$E(\Delta D)$ – освещенность светильника, создаваемая в точке В (рисунок 1);

$E(\Delta D) = 24 \text{ лк}$ – ордината точки пересечения дальности $D = 9 \text{ м}$ с графиком освещенности (на графике № 2);

D_1 – расстояние, проходимое отраженным оптическим рассеянием к телевизионной камере (отрезок ВС на рисунке 2).

$$E_2(D) = 0,02 \cdot 24 \cdot e^{-0,25 \cdot 5,5} = 0,121 \text{ (лк)}$$

Результаты вычислений представлены на графике № 3:

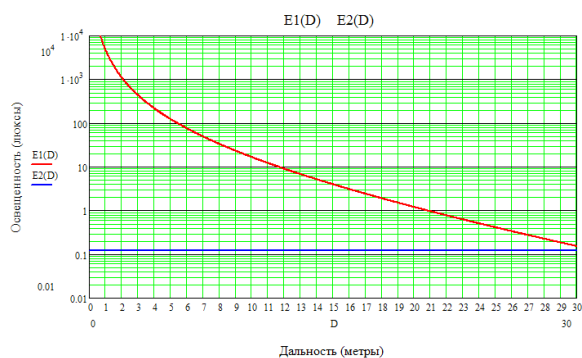


Рис. 4. График 3 – Определение помехи обратного рассеяния (ПОР).

3. Расчет освещенности на входе ТВ камеры, возникающей при отражении светового потока объектом наблюдения

В третьей части методики производится расчет зависимости освещенности $E_3(D)$ на входе ТВ камеры, возникающей при отражении светового потока объектом поиска, от расстояния. Для простоты расчета в качестве объекта поиска берется белый объект, коэффициент отражения которого равен $R_{об.} = 0,8$.

Освещенность $E_3(D)$ на входе телевизионной камеры при отражении светового потока объектом (в данном случае - белым) определяется следующим выражением [6]:

$$E_3(D) = E_1(D) \cdot R_{об.} \cdot e^{-\epsilon \cdot D} = \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{упл} \cdot e^{-k_D \cdot \epsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\epsilon \cdot D} \quad (3)$$

где:
 $R_{об.} = 0,8$ – коэффициент отражения белого объекта.

График зависимости освещенности на входе телевизионной камеры от расстояния представлен за № 4:

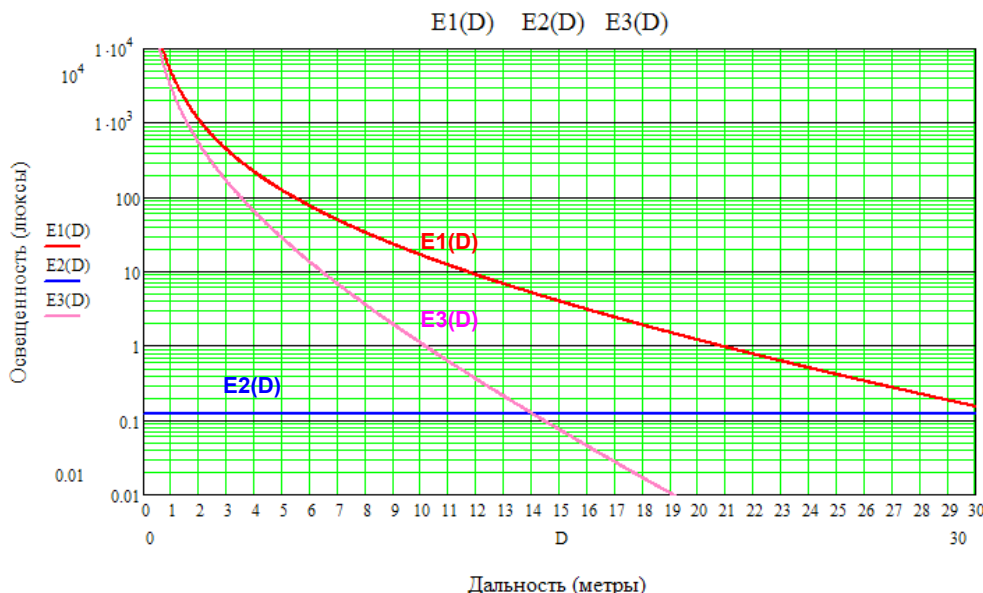


Рис. 5. График 4 – Освещенность на входе телевизионной камеры

Здесь:
 $E_1(D)$ – график зависимости освещенности толщи воды от дальности;
 $E_2(D)$ – график освещенности, создаваемой на входе телевизионной системы помехой обратного рассеяния (ПОР);
 $E_3(D)$ – график зависимости освещенности на входе телевизионной системы от дальности расположения объекта (белого) при отражении от него света.

4. Определение суммарной освещенности на входе телевизионной камеры

В четвертой части методики определяется суммарная освещенность $E_4(D)$, создаваемая на входе телевизионной камеры ПОРом и светом,

отраженным от объекта (в данном случае - белого). Суммарная освещенность $E_4(D)$ на входе телекамеры, создаваемая ПОРом $E_2(D)$ и светом, отраженным от белого объекта $E_3(D)$, выражается формулой [6]:

$$E_4(D) = E_2(D) + E_3(D) = 0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\epsilon \cdot D_1} + \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{упл} \cdot e^{-k_D \cdot \epsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\epsilon \cdot D} \quad (4)$$

Суммарная освещенность необходима для того, чтобы получить значение контраста объекта (в рассматриваемом примере - белого) на разных дальностях его расположения от телевизионной камеры.

5. Расчет контраста белого объекта на входе телевизионной камеры

Контраст белого объекта на входе телевизионной камеры рассчитывается по формуле [6]:

В V части методики выполняется расчет контраста объекта (белого) на входе телевизионной камеры для различных дальностей.

$$K(D) = \frac{E4(D) - E2(D)}{E4(D)} = \frac{0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1} + \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{unn} \cdot e^{-k_D \cdot \varepsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\varepsilon \cdot D} - 0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1}}{0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1} + \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{unn} \cdot e^{-k_D \cdot \varepsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\varepsilon \cdot D}} \quad (5)$$

Зависимость контраста белого объекта на входе телевизионной камеры от дальности представлена на графике № 5:

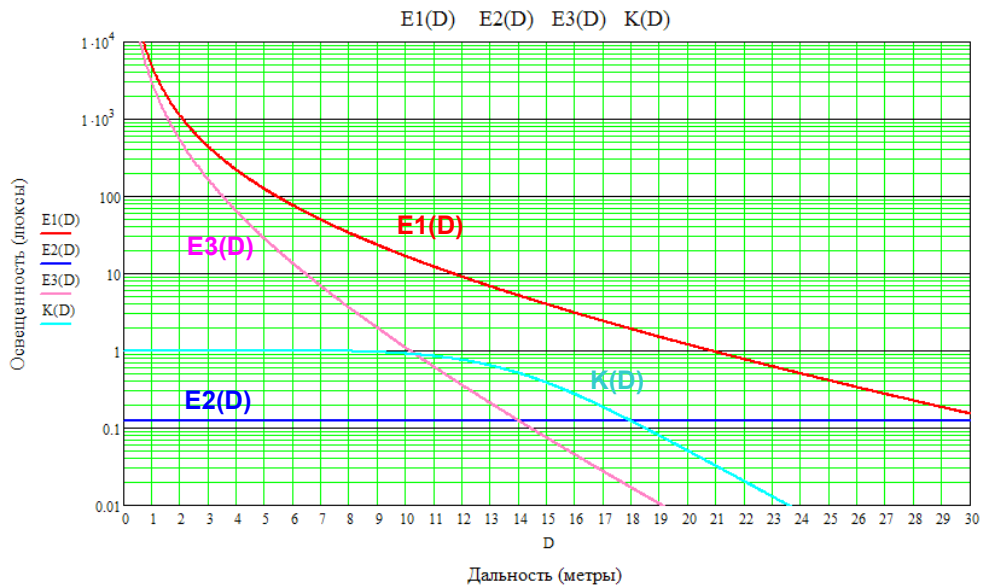


Рис. 6. График 5 – Контраст белого объекта на входе ТВ камеры

Здесь:

$K(D)$ – контраст белого объекта на входе телевизионной камеры. Практика показывает, что максимальный коэффициент отражения (объекты белого цвета) не превышает значения, равного 0,8.

График $K(D)$ позволяет определить максимальную дистанцию до такого объекта, как конус в соответствии с принятыми по условию его размерами. Максимальная дальность ограничивается помехой обратного рассеяния – график $E_2(D)$ – и составляет при рассматриваемых гидрооптических условиях 18 метров - абсцисса точки пересечения графиков $K(D)$ и $E_2(D)$.

6. Расчет контраста черного объекта на входе телевизионной камеры

В VI части методики выполняется расчет контраста черного объекта на входе телевизионной камеры для различных дальностей. Результаты расчета позволят определить минимальную дальность обнаружения такого объекта, как конус, с помощью телевизионной системы подводного видения.

Контраст черного объекта на входе телевизионной камеры рассчитывается по формуле [6]:

$$K1(D) = \frac{E4(D) - E2(D)}{E4(D)} = \frac{0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1} + \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{unn} \cdot e^{-k_D \cdot \varepsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\varepsilon \cdot D} - 0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1}}{0,02 \cdot E(\Delta D) \cdot e^{-\varepsilon \cdot D_1} + \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{unn} \cdot e^{-k_D \cdot \varepsilon \cdot D}}{D^2} \cdot R_{об.} \cdot e^{-\varepsilon \cdot D}} \quad (6)$$

где:

$R_{об.} = 0,1$ – коэффициент отражения черного объекта.

Зависимость контраста черного объекта на входе телевизионной камеры от дальности представлена на графике № 6:

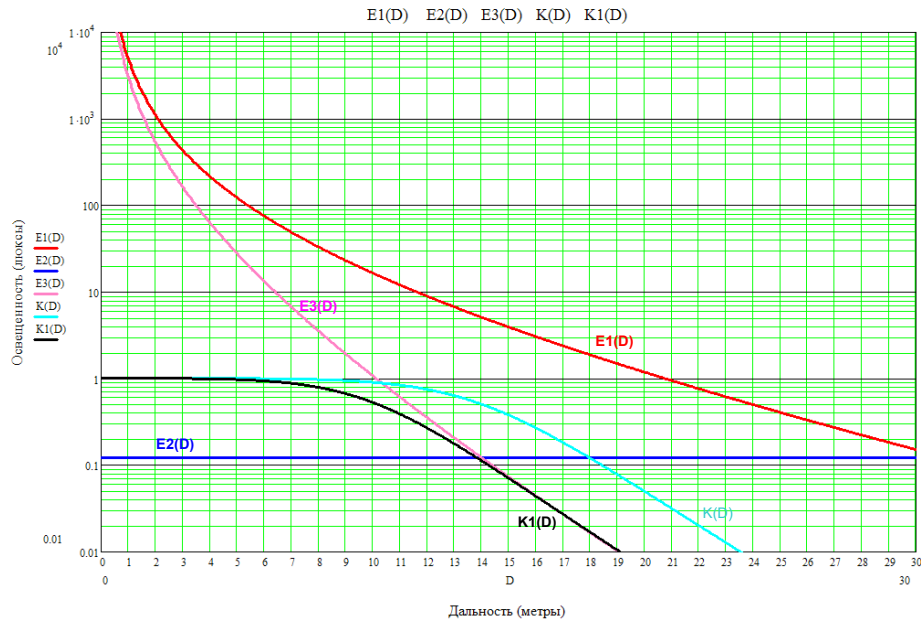


Рис. 7. График 6 – Контраст черного объекта на входе ТВ камеры

Здесь: $K_1(D)$ – контраст черного объекта на входе телевизионной камеры.

Как следует из графика № 6, дальность видимости черного объекта, ограниченная помехой обратного рассеяния, составляет 14 метров.

7. Расчет изменения пороговой чувствительности телевизионной камеры

В VII части методики выполнен расчет изменения пороговой чувствительности телевизионной камеры $E_5(D)$ от дальности наблюдения в воде.

Расчет выполняется по формуле [6]:

$$E_5(D) = \frac{E_{\text{порог..ТВ}} \cdot n^2 \cdot e^{k_d \cdot \varepsilon \cdot D}}{\tau_{\text{упл}}} \quad (7)$$

где:

- $\tau_{\text{упл}}$ - коэффициент пропускания света иллюминатором;

- n – коэффициент преломления воды;

- k_d - коэффициент достоверности;

- $E_{\text{порог..ТВ}}$ пороговая освещенность телекамеры

(из паспорта на телекамеру).

Для расчетов выбираем:

- $E_{\text{порог..ТВ}} = 0,01 \text{ л}$;

- $k_d = 0,5$; $n = 1,33$; $\tau_{\text{упл}} = 0,5$ (иллюминатор один).

Расчет изменения пороговой чувствительности телевизионной камеры $E_5(D)$ представлен на графике 7.

Абсциссы точек пересечения графика пороговой чувствительности $E_5(D)$ с графиками, характеризующими контраст белого $K(D)$ и черного

$K_1(D)$ объектов, позволяют определить соответственно максимальную и минимальную дальности, в диапазоне которых исследуемая система подводного видения наблюдает конус любой расцветки (от белого цвета до черного).

График № 7 дает возможность провести анализ выполненных расчетов и оптимально согласовать параметры объекта, осветителей, телевизионной (ТВ) камеры и водной среды с целью достижения максимальной дальности обнаружения.

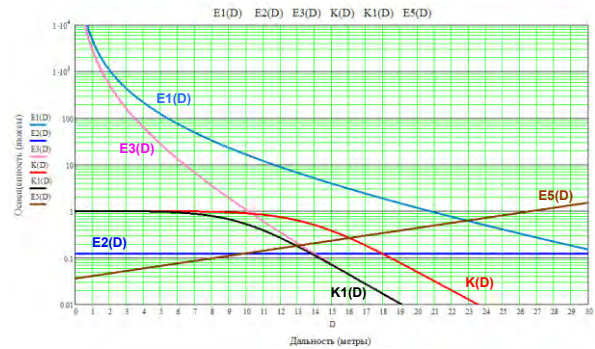


Рис. 8. График 7 – Расчет изменения пороговой чувствительности

Здесь:

$E_5(D)$ – пороговая чувствительность телевизионной камеры.

В частности, изменяя параметры осветительной установки, можно варьировать величиной ПОР. Выбирая пороговую освещенность телевизионной камеры, можно изменять наклон графика $E_5(D)$. Зная размеры и расцветку объекта поиска, не сложно корректировать крутизну графиков контрастности.

Исследование графика № 7 показывает, что вариантов оптимизации процесса поиска несколько. Имеется возможность варьировать соотношениями $E_2(D)$ и $E_5(D)$, изменяя либо угол поля зрения телекамеры, либо ее пороговую чувствительность.

Может быть предложен второй вариант методики практического расчета телевизионного информативного канала, который заключается в варьировании значениями углов засветки осветителей β и углов полей зрения телекамеры θ . При этом для каждой величины β и θ исследуются зависимости контрастов белого и черного объектов, а пороговый контраст выбирается в среднем 3...5%.

Например, для светильников типа «Коралл» отечественной разработки угол засветки для режима поиска целей составляет $\beta = 40^\circ$. Исследуем графические зависимости контраста объектов поиска для $\theta = 20^\circ$ и $\theta = 40^\circ$.

Выполнив расчет зависимостей контрастов белого $K(D)$ и черного $K_1(D)$ объектов от дальностей для выбранных значений β и θ , получим графики № 8 и № 9:

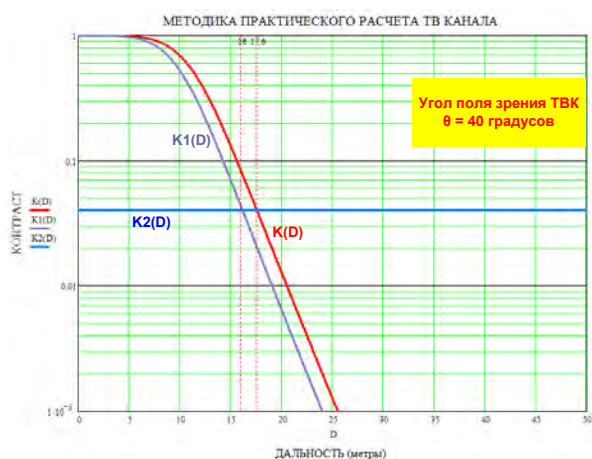


Рис. 9. График 8 – Контраст черного и белого объектов для $\theta = 40^\circ$

Максимальная дальность видимости телевизионного информативного канала для $\theta = 40^\circ$ не превышает 18 м. Полученный результат совпадает результатами практического расчета первого варианта.

Для угла поля зрения телекамеры, равного $\theta = 20^\circ$, дальность действия телевизионного информативного канала представлена на графике № 9:

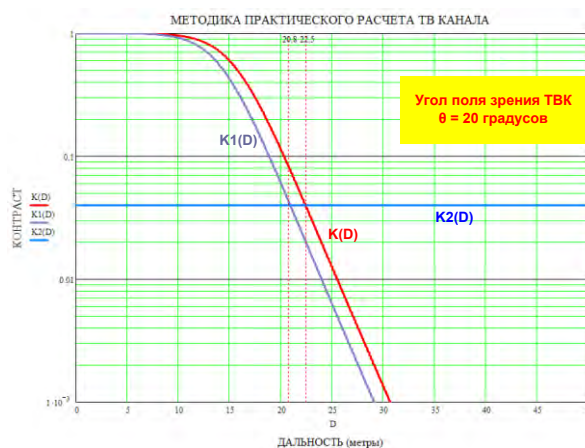


Рис. 10. График 9 - Контраст черного и белого объектов для $\theta = 20^\circ$

Результаты расчетов для графика № 9 показывают, что дальность подводного видения телевизионным информативным каналом при уменьшении угла поля зрения телекамеры до величины $\theta = 20^\circ$ составит не менее 20 м.

Полученный результат обосновывает выполнение поисковых мероприятий глубоководными аппаратами при их отстоянии от грунта до 20 м. Это обеспечивает повышение эффективности подводного поиска не менее, чем в шесть раз по сравнению с существующими аналогами поисковых средств. Поисковая производительность робототехнических комплексов возрастает за счет увеличения зоны обзора на траверзах гидролокаторами бокового обзора и введения лазерного канала для подсветки объектов поиска.

Заключение

Использование предложенной методики моделирует различные тактические ситуации перед выходом подводного аппарата в море и обеспечивает проведение численного расчета как дальности обнаружения целей телевизионным информативным каналом, так и эффективности интегрированной поисковой системы в целом.

Литература

1. Л.С. Долин, И. М. Левин. Справочник по теории подводного видения. Л., Гидрометеиздат, 1991., с. 43.
2. В.Е. Карасик, В. М. Орлов. Лазерные системы видения. М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001, с. 230.
3. Г.Н. Грязин. Системы прикладного телевидения. СПб, Политехника, 2000, с. 193.
4. В.Е. Джакония. Телевидение. М., Радио и связь, 1986, с. 11.
5. О.А. Соколов. Видимость под водой. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 48.
6. Мартынов В.Л., Краснопольский В. Е. «Пути повышения поисковой производительности подводных аппаратов» (тезисы докладов научной конференции). Материалы юбилейной научно-практической конференции, посвященной 30-летию 15 ЦНИЛ ВМФ, с. 49...54. Санкт-Петербург, 2007 г.
7. В.С. Колобков, Ю. П. Лагутин, В. А. Куликов. Перспективные осветительные установки подводных телевизионных систем дальнего наблюдения. Научно-технический отчет. Кн. 2. СПб, ФГУП «НИИТ», 1998, с. 19.
8. Мартынов В.Л., Ксенофонтов Ю.Г., Скрипник И.Л. «Влияние помехи обратного рассеяния на эффективность инфотелекоммуникаций при проведении подводного поиска». «Морские интеллектуальные технологии», № 3 (49). Санкт-Петербург, 2020, с. 142.

References

1. Dolin L. S., Levin I. M. Spravochnik po teorii podvodnogo videniya [Handbook of Underwater Vision Theory]. L., izd. "Gidrometeoizdat", 1991, 43 s.
2. Karasik V. E., Orlov V. M. Lazernye sistemy videniya [Laser vision systems]. M., izd. MGTU im. N. E. Baumana, 2001, 230 s.
3. Gryazin G. N. Sistemy prikladnogo televideniya [Applied television systems]. SPb, izd. "Politekhnika", 2000, 193 s.
4. Dzhakoniya V. E. Televidenie [Television]. M., izd. "Radio i svyaz", 1986, 11 s.
5. Sokolov O. A. Vidimost' pod vodoj [Visibility under water]. L., izd. "Gidrometeoizdat", 1974, 48 s.
6. Martynov V. L., Krasnopol'skiy V. E. Puti povysheniya poiskovoy proizvoditel'nosti podvodnykh apparatov [Ways to improve the search performance of underwater vehicles]. *Materialy yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 30-letiyu 15 TsNIL VMF. Sankt-Peterburg, 2007*, s. 49-54.
7. Kolobkov V. S., Lagutin Yu. P., Kulikov V. A. Perspektivnye osvetitel'nye ustanovki podvodnykh televizionnykh sistem dal'nego nablyudeniya [Advanced lighting installations for underwater television systems for long-range surveillance]. *Nauchno-tekhnicheskiiy otchet. Kn. 2. SPb, FGUP «NIIT», 1998*, 19 s.
8. Martynov V. L., Ksenofontov Yu. G., Skripnik I. L. Vliyaniye pomekhi obratnogo rasseyaniya na effektivnost' infotelekkommunikatsiy pri provedenii podvodnogo poiska [Effect of backscattering interference on the efficiency of infotelecommunication during underwater search]. «*Morskie intellektual'nye tekhnologii*», № 3 (49). Sankt-Peterburg, 2020, s. 142-149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Леонидович Мартынов, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Юрий Леонардович Сиек, доктор технических наук, доцент, декан факультета морского приборостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: siek@mail.ru

Александр Николаевич Борисов, старший преподаватель кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: bor_fond93@mail.ru

Viktor L. Martynov, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of Radio Communication in the Navy, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Yuriy L. Siek, Dr.Sci. (Eng), Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: siek@mail.ru

Aleksandr N. Borisov, Senior Lecturer of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bor_fond93@mail.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 534.26

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.011>

Использование интеграла Кирхгофа для приближенного расчета угловых характеристик рассеяния звука упругими оболочками неаналитической формы

С.Л. Ильменков¹, e-mail: sl_ilmenkov@mail.ru, А.В. Богородский² e-mail: okr@oceanpribor.ru, Г.А. Лебедев¹ e-mail: office@smtu.ru, А.В. Троицкий³ e-mail: avtroitskiy@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

² Концерн «Океанприбор»

³ Крыловский государственный научный центр

Аннотация Предложен новый приближенный метод расчета угловых характеристик рассеяния звука на упругих телах неаналитической формы при различных геометрических параметрах стыкуемых фрагментов аналитической формы. Метод базируется на использовании интегральной формулы Кирхгофа и известных строгих решениях задач дифракции звука на упругих аналитических телах. Совместное использование методов динамической теории упругости и разделения переменных с помощью потенциалов Дебая и «типа Дебая» позволяет получить решения задач дифракции звука на изотропных оболочках неаналитической формы, составленных из компонентов сфероидальной, цилиндрической и сферической форм. Вычислены и проанализированы угловые характеристики рассеяния при различных волновых размерах, геометрических и физических параметрах оболочек. Применение рассматриваемого метода имеет особенно актуально в диапазонах низких и средних звуковых частот, где упругие тела являются эффективными рассеивателями звука, что повышает вероятность определения их индивидуальных признаков.

Ключевые слова: интеграл Кирхгофа, упругие оболочки, потенциалы Дебая, угловые характеристики.

Using the Kirchhoff integral for approximate calculation of angular characteristics of sound scattering by elastic shells of nonanalytical form

Sergey L. Ilmenkov¹ e-mail: sl_ilmenkov@mail.ru, Alexey V. Bogorodskiy² e-mail: okr@oceanpribor.ru, German A. Lebedev¹ e-mail: office@smtu.ru, Alexey V. Troitskiy³ e-mail: avtroitskiy@gmail.com

¹ St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

² Concern «Oceanpribor», Russian Federation

³ Krylov State Research Centre, Russian Federation

Abstract A new approximate method for calculating the angular characteristics of sound scattering on elastic bodies of non-analytical form for various geometric parameters of the joined fragments of the analytical shape we proposed. The method they based on the use of the Kirchhoff integral formula and well-known rigorous solutions of sound diffraction problems on elastic analytical bodies. The combined use of methods of the dynamic theory of elasticity and separation of variables using Debye potentials and "Debye type" potentials allows us to obtain solutions to problems of sound diffraction on isotropic shells of non-analytical form composed of components of spherical, cylindrical and spherical forms. Angular scattering characteristics are calculated and analyzed for various wave sizes, geometric and physical parameters of the shells are calculated. The application of this method is particularly relevant in the low and medium sound frequency ranges, where elastic bodies are effective sound diffusers, which increases the probability of determining their individual characteristics.

Keywords: Kirchhoff integral, elastic shells, Debye potentials, angular characteristics.

Введение

Получение числовых результатов точных решений задач дифракции и излучения звука упругими телами возможно лишь для тел с аналитической формой поверхности и связано со значительными математическими и вычислительными трудностями. Для упругих объектов, по форме и физическим параметрам более близких к реальным, широкое применение находят приближенные и численные методы, основанные на принципе Гюйгенса в формулировке Френеля или Кирхгофа, интегральных уравнений, Т-матриц, конечных (МКЭ) и граничных (МГЭ) элементов и др. Развитие приближенных методов решения таких задач приобретает особую значимость для низко- и среднечастотного звуковых диапазонов, в которых упругие тела являются весьма эффективными рассеивателями звука, что повышает вероятность определения их индивидуальных признаков. В

данной работе на основе интегральной формулы Кирхгофа и принципов динамической теории упругости рассматривается новый подход к решению задачи рассеяния звука на упругой оболочке неаналитической формы, составленной из фрагментов упругих оболочек сфероидальной, цилиндрической и сферической форм.

1. Расчет угловых характеристик рассеяния звука упругой оболочкой в форме конечного цилиндра с полусфероидами по торцам

Обратимся сначала к рассеивателю неаналитической формы в виде упругой круговой цилиндрической оболочки конечной длины L , толщиной $d=a_1-a_0$, ограниченной по торцам половинами вытянутой сфероидальной оболочки с полуфокусным расстоянием h_0 [14,15]. Внутри оболочки-вакуум, снаружи-вода (рис.1).

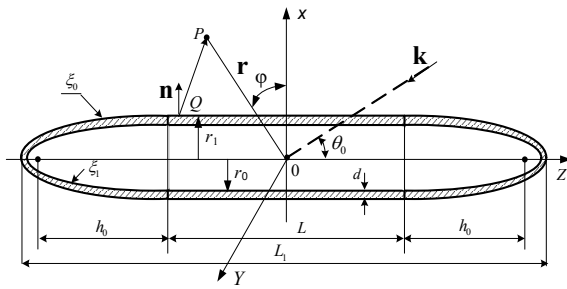


Рис. 1. Упругая оболочка, составленная из цилиндрической и полусферoidalных частей.

В соответствии с интегральной формулой Кирхгофа алгоритм расчета звукового давления в точке P дальнего поля требует знания амплитудно-фазового распределения звукового давления $p(Q)$ и нормальной составляющей колебательной скорости $\frac{\partial}{\partial n} p(Q)$ в точках Q на замкнутой поверхности интегрирования S [1-3, 12] (см. Рис. 1):

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \int [p(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) - \frac{\partial}{\partial n} p(Q) G(P, Q)] dS, \quad (1)$$

Эти значения могут быть получены из строгих решений трехмерных задач дифракции на изотропных оболочках: бесконечной цилиндрической и сферoidalной. Данные решения базируются на методах динамической теории упругости, разделения переменных и использовании потенциалов Дебая («типа Дебая») [8-11].

В данном случае в интегральной формуле Кирхгофа функция Грина выбирается в виде потенциала точечного источника в виде:

$$p_0 = e^{ikR} / R, \quad (2)$$

где $k = \omega/c$; $\omega = 2\pi f$; f -частота в Гц, c -скорость звука в жидкой среде, м/с; R – расстояние между точками P и Q .

Геометрия трехмерной задачи дифракции при наклонном падении звуковой волны на упругую полую бесконечную цилиндрическую оболочку [3], фрагмент которой входит в состав поверхности неаналитического рассеивателя, представлена на рис. 2 ($a = r_1$).

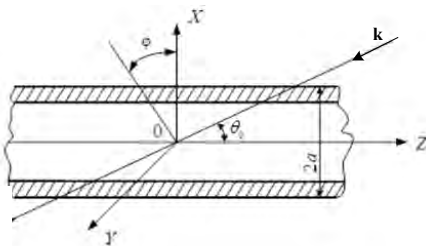


Рис. 2. Упругая бесконечная цилиндрическая оболочка.

Скалярный потенциал падающей плоской волны $\Phi_i(r, \varphi, z)$ единичной амплитуды с волновым вектором \mathbf{k} , наклоненным под углом θ_0 к оси z (см. Рис. 2), разложим по собственным функциям скалярного уравнения Гельмгольца в круговой цилиндрической системе координат [3]:

$$\Phi_i(r, \varphi, z) = e^{iyz} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (-i)^m J_m(k_\gamma r) \cos m\varphi, \quad (3)$$

где

$$\gamma = k \cos \theta_0; k_\gamma = k \sin \theta_0; \varepsilon_m = \begin{cases} 1 & \text{при } m = 0; \\ 2 & \text{при } m \neq 0. \end{cases}$$

Используем представление для векторного потенциала оболочки Ψ через потенциалы «типа Дебая», приведенное в [3, 8, 13]:

$$\Psi = \text{rot} \chi \mathbf{e} + \text{rot} \psi \mathbf{e}; \quad (4)$$

где \mathbf{e} - единичный орт в направлении оси z ; χ и ψ - скалярные потенциалы, удовлетворяющие скалярному уравнению Гельмгольца:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \chi + \kappa^2 \chi &= 0 \\ \Delta \psi + \kappa^2 \psi &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где κ - волновое число поперечной волны в материале оболочки.

Скалярный потенциал оболочки Φ , потенциалы χ и ψ , потенциал рассеянной волны Φ_s представим в виде разложений по собственным функциям скалярного уравнения Гельмгольца в круговых цилиндрических координатах [3, 13, 14]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= e^{iyz} \sum_{m=0}^{\infty} [A_m J_m(h'r) + B_m N_m(h'r)] \cos m\varphi; \\ \chi &= e^{iyz} \sum_{m=0}^{\infty} [C_m J_m(\kappa'r) + D_m N_m(\kappa'r)] \cos m\varphi; \\ \psi &= e^{iyz} \sum_{m=0}^{\infty} [E_m J_m(\kappa'r) + F_m N_m(\kappa'r)] \sin m\varphi; \\ \Phi_s &= e^{iyz} \sum_{m=0}^{\infty} G_m H_m^{(1)}(\kappa_\gamma r) \cos m\varphi; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $h' = (h^2 - k^2)^{1/2}$; $\kappa' = (\kappa^2 - k^2)^{1/2}$; h - волновое число продольной волны в материале оболочки.

$A_m, B_m, C_m, D_m, E_m, F_m, G_m$ - неизвестные коэффициенты, которые находятся из граничных условий:

- 1) непрерывность нормальных компонент вектора смещения в упругой оболочке и жидкой среде на внешней границе;
- 2) равенство нормального напряжения в упругой оболочке на внешней границе давлению в жидкой среде;
- 3) отсутствие нормального напряжения на внутренней поверхности полую оболочку;
- 4) отсутствие касательных напряжений на обеих поверхностях оболочки.

Подставляя разложения (6) в граничные условия, получаем неоднородную систему семи уравнений относительно бесконечного числа неизвестных коэффициентов разложений потенциалов. Используя ортогональность тригонометрических функций $\cos m\varphi$ и $\sin m\varphi$, сведем задачу к отысканию семи неизвестных коэффициентов из семи уравнений. Коэффициенты G_m потенциала рассеянной волны определяются по правилу Крамера из отношения двух определителей седьмого порядка:

$$G_m = \Delta' / \Delta, \tag{7}$$

где Δ' - минор системы, а Δ – ее определитель, равные [3,13,14]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & 0 \end{vmatrix}$$

$$\Delta' = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & b_{17} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & b_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & 0 \end{vmatrix}$$

Значения элементов определителей приведены в [3].

Связь между рассеянным давлением p_s и скалярным потенциалом смещения рассеянной волны Φ_s определяется соотношением:

$$p_s = -\rho\omega^2\Phi_s, \tag{8}$$

где ρ – плотность жидкой среды.

Угловая характеристика рассеяния $D(\theta, \varphi)$ может быть определена из выражения:

$$p_s(r, \theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \exp(ikr) / r; \tag{9}$$

где r, θ, φ - сферические координаты точки наблюдения.

Схема решения трехмерной задачи дифракции звука на упругой полой сфероидальной оболочке (рис.3) схожа со схемой, принятой для бесконечного цилиндра.

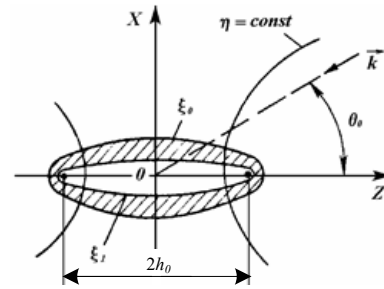


Рис.3. Упругая сфероидальная оболочка.

Векторный потенциал Ψ в данном случае представляются с помощью потенциалов Дебая U и V [3,4,8]:

$$\Psi = \text{rotrot}(\mathbf{R}U) + i\text{krot}(\mathbf{R}V), \tag{10}$$

где \mathbf{R} - радиус-вектор точки наблюдения.

Все потенциалы – падающей плоской волны Φ_0 , рассеянной волны Φ_s , скалярный потенциал оболочки Φ , потенциалы Дебая U и V раскладываются в ряды по волновым сфероидальным функциям [3,13]:

$$\Phi_0 = 2 \sum_{n>m} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^{-n} \overline{S_{m,n}}(C, \eta_0) \overline{S_{m,n}}(C, \eta) R_{m,n}^{(1)}(C, \xi_0) \cos m\varphi; \tag{11}$$

$$\Phi_s(\xi, \eta, \varphi) = 2 \sum_{n \geq m} \sum_{m=0}^{\infty} B_{m,n} \overline{S_{m,n}}(C, \eta) R_{m,n}^{(3)}(C, \xi) \cos m\varphi; \tag{12}$$

$$\Phi(\xi, \eta, \varphi) = 2 \sum_{n>m} \sum_{m=0}^{\infty} \overline{S_{m,n}}(C_1, \eta) [C_{m,n} R_{m,n}^{(1)}(C_1, \xi) + D_{m,n} R_{m,n}^{(2)}(C_1, \xi)] \cos m\varphi; \tag{13}$$

$$U = 2 \sum_{n>m} \sum_{m=0}^{\infty} \overline{S_{m,n}}(C_2, \eta) [F_{m,n} R_{m,n}^{(1)}(C_2, \xi) + G_{m,n} R_{m,n}^{(2)}(C_2, \xi)] \sin m\varphi; \tag{14}$$

$$V = 2 \sum_{n>m} \sum_{m=0}^{\infty} \overline{S_{m,n}}(C_2, \eta) [H_{m,n} R_{m,n}^{(1)}(C_2, \xi) + I_{m,n} R_{m,n}^{(2)}(C_2, \xi)] \cos m\varphi; \tag{15}$$

где $C_1 = h \cdot h_0$; $C_2 = \kappa \cdot h_0$; $\eta = \cos\theta$.

$\overline{S_{m,n}}(C, \eta)$ - нормированная угловая сфероидальная функция; $R_{m,n}^{(1)}(C, \xi)$; $R_{m,n}^{(3)}(C, \xi)$ - радиальные сфероидальные функции 1-го и 3-го рода соответственно

Неизвестные коэффициенты разложений, как и ранее, отыскиваются из физических граничных условий на поверхностях ξ_0 и ξ_1 . Для данной оболочки с параметрами: $L = h_0 = 10a$; $r_1 = r_0 + d$; $\xi_0 = 1,005075$; $\xi_1 = 1,005$ были выполнены расчеты $|D(\theta, \varphi)|$ при $\theta_0 = 90^\circ$

Результаты расчетов в плоскости hox представлены на рис.4: а) $ka = 0,5$; ($C = 5$); $kd = 0,005$; б) $ka = 0,5$; $kd = 0,01$; в) $ka = 1,0$; ($C = 10$); $kd = 0,005$. Кривая 1 соответствует абсолютно жесткому телу той же формы, кривая 2 – стальной, кривая 3 – алюминиевой оболочкам.

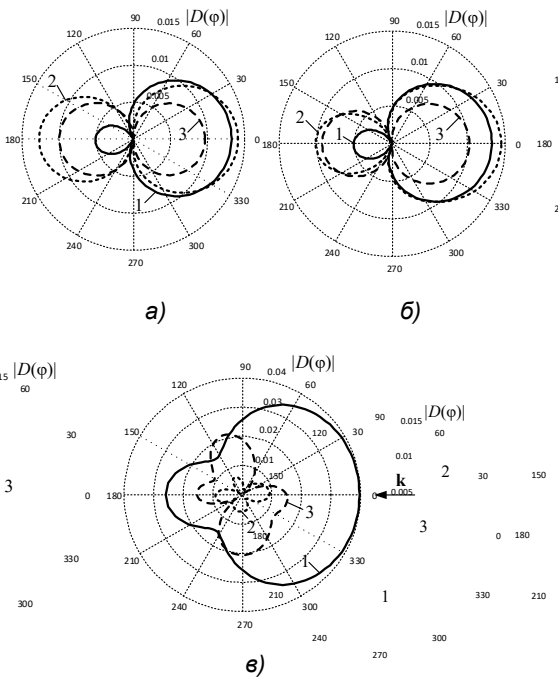


Рис. 4. Модули угловых характеристик $|D(\varphi)|$ рассеивателя в форме цилиндра с полусферами по торцам: а) $ka=0,5; kd=0,005$; б) $ka=0,5; kd=0,01$; в) $ka=0,1; kd=0,005$.

2. Расчет угловых характеристик рассеяния звука упругой оболочкой в форме конечного цилиндра с полусферами по торцам

В качестве второго варианта рассеивателя неаналитической формы рассмотрим упругую оболочку, образованную соединением конечной цилиндрической оболочки ($L = 20a$; $r_1 = r_0 + d$;) и двух полусферических (торцевых) оболочек того же диаметра [3,5,6] (рис. 5).

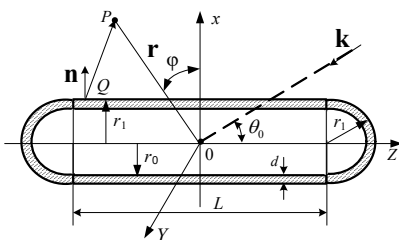


Рис. 5. Упругая оболочка, составленная из цилиндрической и полусферических частей.

В данном случае нужно дополнительно воспользоваться решением осесимметричной задачи дифракции плоской звуковой волны на упругой сферической оболочке в рамках динамической теории упругости и трансформировать это решение применительно к трехмерной задаче. [3,7,13]. Это решение будет мало отличаться от представленного выше решения трехмерной задачи дифракции на упругой сфероидальной оболочке. Векторная функция Ψ и в этом случае будет выражена через потенциалы Дебая U и V , при этом волновые функции сфероидальных координат заменяются на функции сферических координат.

Результаты расчета для данного варианта поверхности (с обозначениями на кривых, аналогичными рис.4) приводятся на рис.6.

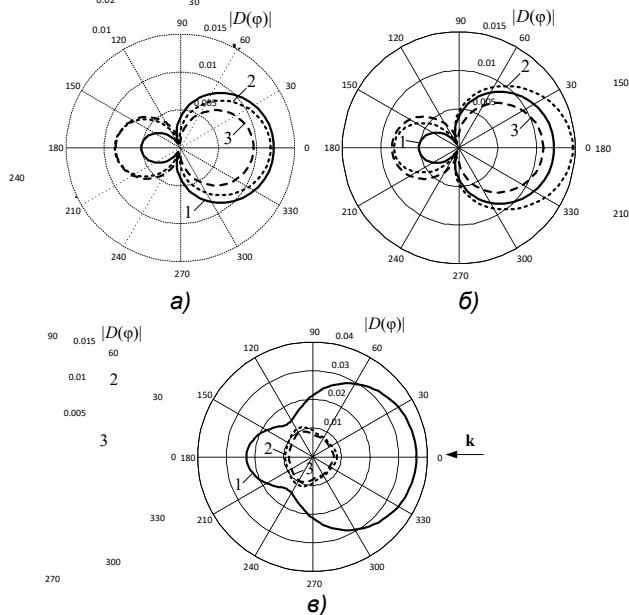


Рис. 6. Модули угловых характеристик $|D(\varphi)|$ рассеивателя в форме цилиндра с полусферами по торцам: а) $ka=0,5; kd=0,005$; б) $ka=0,5; kd=0,01$; в) $ka=1,0; kd=0,05$.

Полученные угловые характеристики в основном схожи с представленными на рис.4, но имеют некоторые особенности, обусловленные различиями в геометрии модели (большее значение L и форма торцевых оконечностей). В частности, это выразилось в несколько большем проявлении акустически жесткого фона характеристик.

Заключение

В статье предложен новый приближенный метод расчета угловых характеристик рассеяния звука для упругих тел неаналитической формы при различных геометрических параметрах стыкуемых фрагментов. Метод базируется на строгих решениях задач рассеяния звука на упругих аналитических телах, при реализации которого получены следующие выводы:

- 1) при $ka < 1,0$ характеристики рассеяния стальной оболочки в освещенной области в целом близки к таковым для абсолютно жесткого тела, а в теневой - преобладает акустически мягкий фон ее полости;
- 2) для $ka = 0,5 \div 2,0$ увеличение относительной толщины упругой оболочки в пределах диапазона $0,001 \div 0,01$ приводит к некоторому уменьшению теневого рассеяния и практически не сказывается на обратном отражении;
- 3) при $ka > 1,0$ поведение упругих оболочек оказывается более сложным, в частности, максимум рассеяния смещается в поперечных направлениях, а возрастание ее толщины способствует формированию угловых характеристик рассеяния, схожих с теми, которые наблюдаются для акустически жесткого тела;
- 4) замена полусфероидальных оконечностей оболочек на полусферические способствует возрастанию акустически жесткого фона рассеяния.

Литература

1. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989.301 с.
2. Клещёв А.А., Ключин И.И. Основы гидроакустики.Л.: Судостроение, 1987. 224 с.
3. Клещёв А.А. Гидроакустические рассеиватели // Второе издание. СПб., Прима, 2011. 267 с.
4. Клещёв А.А., Шейба Л.С. Рассеяние звуковой волны идеальными вытянутыми сфероидами // Акустический журнал. 1970. Т.16. № 1.С.264-268.
5. Клещёв А. А. Рассеяние звука идеальными телами неаналитической формы // Труды ЛКИ. Общесудовые системы. 1989. С. 95-99.
6. Клещев А.А. Дифракция звука на телах со смешанными граничными условиями // Акустический журнал. 1974. Т. 20. № 4. С. 632-634.
7. Клещёв А.А., Ростовцев Д.М. Рассеяние звука упругой и жидкой эллипсоидальными оболочками вращения // Акустический журнал. 1986. Т. 31. №5. С. 691-694.
8. Клещёв А.А. Потенциалы Дебая и «типа Дебая» в задачах дифракции, излучения и распространения упругих волн // Акустический журнал. 2011.Т.58.34.С.338-344.
9. Клещёв А. А. Метод интегральных уравнений в задаче дифракции звука на упругой оболочке неаналитической формы // Техническая акустика. Т. 1. 1992. Вып. 4(6). С. 65 – 66.
10. Римский-Корсаков А.В., Цукерников И.Е. О расчете диаграммы направленности по результатам измерения звукового давления в ближнем поле излучателя // Акустический журнал. 1977. Т.22. №6. С.919-928.
11. Ильменков С.Л., Клещёв А.А. Излучение упругими телами сфероидальной формы и связь его с дифракцией звука на них. // Труды ЛКИ: Судовая акустика. 1989. С. 15-20.
12. Ильменков С.Л. Метод функций Грина в задаче дифракции звука на телах неаналитической формы. // Морские интеллектуальные технологии. №1(23), Т.2,2014, С.32-36.
13. Ильменков С.Л., Клещёв А.А., Клименков А.С. Метод функций Грина в задаче дифракции звука на упругой оболочке неаналитической формы // Акустический журнал, 2014, Т. 60, № 5, С. 579–586.
14. Ильменков С.Л., Клещев А.А., Клименков А.С., Майоров В.С., Чижов Г.В. Применение метода функций Грина в задачах дифракции звука на идеальных и упругих телах. Труды Крыловского государственного научного центра, 2017,4(382). С.117-128.

References

1. Shenderov E.L. Izluchenie i rasseyaniye zvuka [Radiation and scattering of sound]. L.: Sudostroenie, 1989.301 s.
2. Kleshchyov A.A., Klyukin I.I. Osnovy gidroakustiki [Fundamentals of hydroacoustics].L.: Sudostroenie, 1987. 224 s.
3. Kleshchyov A.A. Gidroakusticheskie rasseivateli [Hydroacoustic scatterers] //Vtoroe izdanie.SPb., Prima, 2011. 267 s.
4. Kleshchyov A.A., SHejba L.S. Rasseyaniye zvukovoy volny ideal'nymi vytyanutymi sferoidami [The Scattering of sound waves ideal elongated spheroids] // Akusticheskij zhurnal. 1970. T. 16. №1.S.264-268.
5. Kleshchyov A. A. Rasseyaniye zvuka ideal'nymi telami neanaliticheskoy formy [Scattering by ideal bodies of non-analytical form] // Trudy LKI. Obshchেসudovoye sistemy. 1989. S. 95-99.
6. Kleshchev A.A. Difrakciya zvuka na telah so smeshannymi granichnymi usloviyami [Diffraction of sound on bodies with mixed boundary conditions] // Akusticheskij zhurnal. 1974. T. 20. № 4. S. 632-634.
7. Kleshchyov A.A., Rostovcev D.M. Rasseyaniye zvuka uprugoj i zhidkoj ellipsoidal'nymi obolochkami vrashcheniya [Scattering of sound by elastic and liquid ellipsoidal shells of rotation] // Akusticheskij zhurnal. 1986. T. 31. №5. S. 691-694.
8. Kleshchyov A.A. Potencialy Debaya i «tipa Debaya» v zadachah difrakcii, izlucheniya i rasprostraneniya uprugih voln [Debye and "Debye type" Potentials in problems of diffraction, radiation and propagation of elastic waves] //Akusticheskij zhurnal. 2011.T.58.34.S.338-344.
9. Kleshchyov A. A. Metod integral'nyh uravnenij v zadache difrakcii zvuka na uprugoj obolochke neanaliticheskoy formy [Method of integral equations in the problem of sound diffraction on an elastic shell of non-analytical form] // Tekhnicheskaya akustika. T. 1. 1992. Vyp. 4(6). S. 65 – 66.
10. Rimskij-Korsakov A.V., Cukernikov I.E. O raschete diagrammy napravlenosti po rezul'tatam izmereniya zvukovogo davleniya v blizhnem pole izluchatelya [On the calculation of the directional diagram based on the results of sound pressure measurement in the near field of the radiator] //Akusticheskij zhurnal.1977. T.22. №6. S.919-928.
11. Il'menkov S.L., Kleshchyov A.A. Izlucheniye uprugimi telami sferoidal'noj formy i svyaz' ego s difrakciej zvuka na nih [Radiation by elastic bodies of spheroidal shape and its connection with the diffraction of sound on them] // Trudy LKI: Sudovaya akustika. 1989. S. 15-20.
12. Il'menkov S.L. Metod funkcyj Grina v zadache difrakcii zvuka na telah neanaliticheskoy formy [Green's functions method in the problem of sound diffraction on non-analytical bodies] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. №1(23), T.2,2014,S.32-36.
13. Il'menkov S.L., Kleshchyov A.A., Klimenkov A.S. Metod funkcyj Grina v zadache difrakcii zvuka na uprugoj obolochke neanaliticheskoy formy [Method of Green's functions in the problem of sound diffraction on elastic shell non-analytic forms] //Akusticheskij zhurnal, 2014, T. 60, № 5, S. 579–586.
14. Il'menkov S.L., Kleshchev A.A., Klimenkov A.S., Majorov V.S., CHizhov G.V. Primeneniye metoda funkcyj Grina v zadachah difrakcii zvuka na ideal'nyh i uprugih telah [Application of the Green's functions method in problems of sound diffraction on the ideal and elastic bodies] // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2017,4(382).S.117-128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Львович Ильменков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: sl_ilmenkov@mail.ru

Алексей Витальевич Богородский, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Концерн «Океанприбор», 197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46, e-mail: okr@oceanpribor.ru

Герман Андреевич Лебедев, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: office@smtu.ru

Алексей Викторович Троицкий, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: avtroitskiy@gmail.com

Sergey L. Ilmenkov, Ph.D. (Eng), the associate professor, the associate professor of Department of marine automation and measurement, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: sl_ilmenkov@mail.ru

Alexey V. Bogorodskiy, Dr.Sci. (Eng), leading researcher, joint-stock company Concern «Oceanpribor» Chkalovsky Ave., 46, St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: okr@oceanpribor.ru

German A. Lebedev, Dr.Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of Department of physics, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: office@smtu.ru

Alexey V. Troitskiy, Dr.Sci. (Eng), leading researcher, Krylov State Research Centre, Moskovsky Ave., 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: avtroitskiy@gmail.com

Поступила в редакцию: 14.03.2021

Принята к публикации: 15.05.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 629.584

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.043>

Особенности расчёта динамических задач с трением с помощью ПК «ADAMS»

К.А. Лесных¹ e-mail: leslas@bk.ru, С.А. Никонов¹ e-mail: nikonov_smtu@mail.ru,
Н.В. Островская² e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. Актуальность поднимаемых в статье вопросов обусловлена широким применением программных комплексов для численного эксперимента в области механики и необходимостью верификации полученных результатов. В представленной работе отражены возможности программного пакета виртуального моделирования ADAMS для численного анализа динамических задач с учетом трения. В качестве объекта исследования рассмотрено устройство кривошипно-шатунного механизма, имеющего в своём составе фрикционную муфту. Для демонстрации возможностей моделирования задач с учетом трения в ПК ADAMS приведены различные примеры, верифицирующие аналитические решения с численными. Для исследования работы муфты была подтверждена зависимость момента сил трения от относительной скорости и смоделирована работа кривошипно-шатунного механизма. Отдельно была рассмотрена задача о получении коэффициентов трения качения, которые в результате моделирования в ПК ADAMS, оказываются значительно меньше своих предельных коэффициентов трения качения.

Ключевые слова: MSC.Software, ADAMS, динамический расчет приводов механизмов, сухое трение, коэффициент трения качения, твердотельное моделирование

Features of dynamic problems with friction calculation by means of an «ADAMS» package

Kir A. Lesnyh¹ e-mail: leslas@bk.ru, Semyon A. Nikonov¹ e-mail: nikonov_smtu@mail.ru,
Nadezda V. Ostrovskaya² e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru,

¹St. Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The relevance of the issues raised in the article is due to the widespread use of software systems for numerical experiments in the field of mechanics and the need to verify the results obtained. Possibilities of the virtual modeling software package ADAMS for the numerical analysis of dynamic tasks taking into account friction are reflected in work. As an object of a research the device of the crank-conrod mechanism in incorporating the frictional coupling is considered. For demonstration of tasks taking into account friction modeling opportunities in an ADAMS package various examples verifying analytical decisions with numerical are given. For a research of the coupling the dependence of the friction forces moment operation on relative speed was confirmed and operation of the crank-conrod mechanism is simulated. The task about receiving coefficients of swing friction which as a result of modeling in an ADAMS package, appear much less than the limit coefficients of swing friction was separately considered.

Key words: MSC.Software, ADAMS, static and dynamic calculation of mechanisms drives, dry friction, rolling friction coefficient, solid-state model operation

Введение

Данная статья является завершающей в цикле материалов о возможностях виртуального моделирования с помощью ПК ADAMS [1-3].

В работе рассматриваются способы моделирования трения в ПК ADAMS заданием взаимодействия двух и более трёхмерных тел при помощи процедуры CONTACT [4]. Приведены примеры различных динамических задач с учетом трения для сравнения аналитического решения с численным.

Моделирование трение в ПК ADAMS

Первоначально моделирование трения было необходимо для нахождения решения конкретной задачи: динамического анализа механизма выдвигания блока *E* из походного положения в рабочее, имеющего в своём составе фрикционную муфту *D* (рис. 1). В дальнейшем было решено

исследовать способы задания трения в ПК ADAMS и заменить нашу задачу более простой – кривошипно-шатунным механизмом, имеющем в своём составе фрикционную муфту, выполнить сравнение теоретических результатов и результатов, полученных в ходе моделирования.

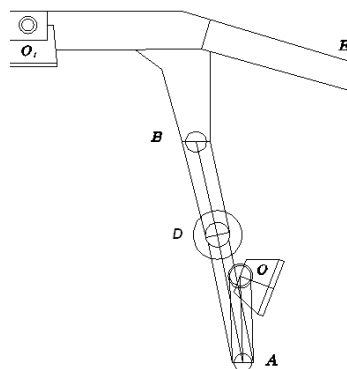


Рис. 1. Общий вид механизма

Картина трения в пакете ADAMS определяется заданием четырёх величин [4] – статический коэффициент μ_s , динамический коэффициент μ_k , и соответствующие им скорости V_s и V_k . График зависимости силы трения от относительной скорости изображен на рис. 2. Таким образом, в ПК ADAMS могут быть реализованы четыре картины трения – рис. 3 [5, 6].

Для моделирования функции CONTACT используются следующие коэффициенты [4]:

STIFFNESS – жёсткость контактирующего слоя. Данная величина зависит от формы контактирующих тел, а также от свойств их материалов. По теории Герца вычисляется следующим образом:

$$K = \sqrt{\frac{16RE^2}{9}}, \text{ где } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 радиусы кривизны двух поверхностей вблизи точки контакта, они могут быть отрицательными при вогнутых поверхностях

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \eta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \eta_2^2}{E_2}, \quad (2)$$

где η_1 и η_2 - коэффициенты Пуассона двух материалов, и E_1 и E_2 - модули Юнга для двух материалов.

FORCE EXPONENT – по умолчанию.

DAMPING – величина демпфирования, согласно справки ПК ADAMS берётся как 0.01 от величины **STIFFNESS**.

PENETRATION DEPTH – глубина проникновения, косвенно связанная с физической величиной проникновения. Как следует из справки пакета ADAMS е может быть равна нулю, так как контакт моделируется с помощью некоего взаимного проникновения двух тел. В связи со сказанным рекомендуется оставлять эту величину по умолчанию.

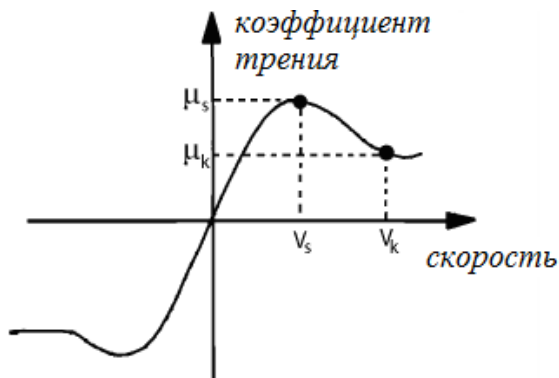


Рис. 2. Зависимости силы трения от относительной скорости контактирующих тел

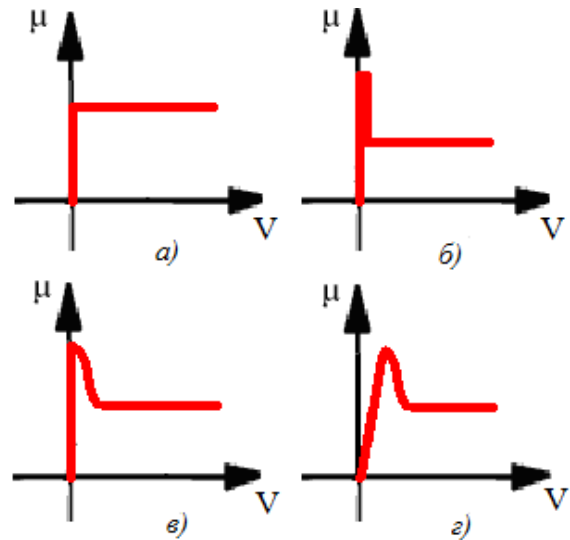


Рис. 3. Моделирование трения в ПК ADAMS

Примеры решения задач с трением

Фрикционные автоколебания груза на пружинке

Классической задачей на исследование трения была задача о фрикционных колебаниях груза на пружинке [7]. Тело 1 движется с постоянной скоростью вдоль оси x и связано с телом 3 посредством пружины 2 (рис. 4).

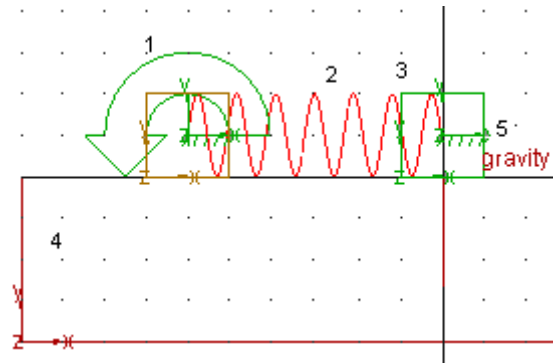


Рис. 4. Внешний вид системы в ПК ADAMS

Тело 3 находится в постоянном контакте 5 с поверхностью 4. Пружина изначально поджата силой равной максимальной силе трения покоя, поэтому практически сразу происходит срыв тела 3. Характеристика силы трения, смоделированная в ПК ADAMS, представлена на рис. 5.

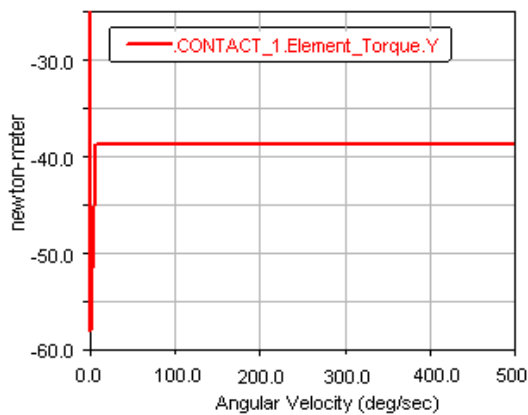


Рис. 5. Моделирование трения в ПК ADAMS

В связи с такой характеристикой силы трения возникают фрикционные автоколебания тела 3. На рис. 6 показаны графики смещения тела 3 во времени и скорость тела 3 во времени соответственно.

Сравнение численных значений ручного счёта с результатом ПК ADAMS до времени очередной остановки тела 3 представлено на рис. 7.

Как видно из полученных результатов – 100% совпадение счёта. Следует сказать, что в данной задаче целесообразней было использовать шарнир типа Translation_Joint, и в нём задать данную характеристику трения.

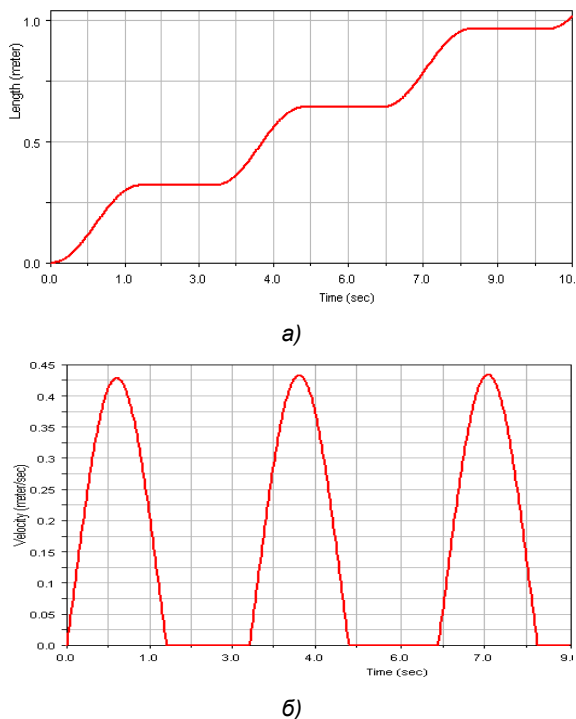


Рис. 6. Графики изменения перемещения (а) и скорости (б) тела 3 во времени

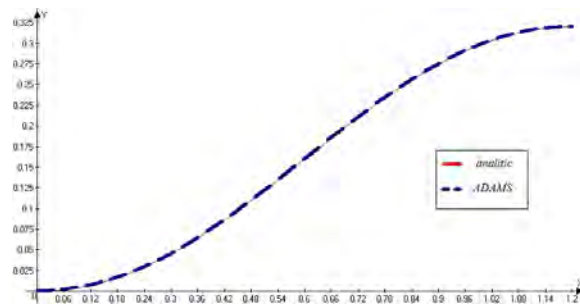


Рис. 7. Сравнение результатов аналитического и численного расчетов

Задача о грузе на веревке

Была рассмотрена простейшая задача о трении [8]: человек массы m_1 , оставаясь на месте, тянет за верёвку груз массы m_2 . Коэффициент трения $\mu < 1$. При какой наименьшей силе натяжения веревки груз может тронуться? Под каким углом должна быть натянута верёвка? Внешний вид системы сил показан на рис. 8.

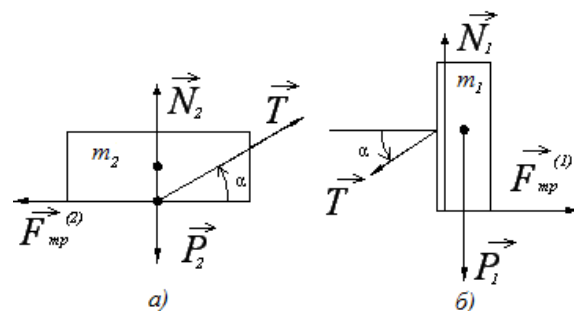


Рис. 8. Схема сил, действующих на груз и человека

Из расчетной схемы следуют соотношения (рис. 8):

$$T \cos \alpha \geq F_{\text{тр}}^2 \text{ (чтобы груз тронулся),}$$

$$T \cos \alpha < F_{\text{тр}}^1 \text{ (чтобы человек не стронулся),}$$

$$N_2 = P_2 - T \sin \alpha \geq 0, N_1 = P_1 + T \sin \alpha \geq 0.$$

Из закона Кулона следует [11]:

$$F_{\text{тр}}^2 \leq \mu N_2, F_{\text{тр}}^1 \leq \mu N_1,$$

где $P_1 = m_1 g, P_2 = m_2 g$.

Подставляя, получаем неравенства:

$$T(1 + \text{tg} \alpha \mu) \geq \frac{\mu P_2}{\cos \alpha},$$

$$T(1 - \text{tg} \alpha \mu) \leq \frac{\mu P_1}{\cos \alpha}$$

Для решения задачи необходимо найти T_{min} , удовлетворяющее полученным неравенствам. Решение задачи находится путём исследования следующего неравенства:

$$f_2(\alpha) = \frac{\mu P_2}{\cos \alpha (1 + \mu \text{tg} \alpha)} \leq T \leq f_1(\alpha) = \frac{\mu P_1}{\cos \alpha (1 - \mu \text{tg} \alpha)} \tag{3}$$

Отметим, что $\alpha \in \left[0, \arctg\left(\frac{1}{\mu}\right) \right]$, так как при $\alpha \geq \arctg\left(\frac{1}{\mu}\right)$ второе из неравенств (1) выполнено заведомо, а из первого получаем $T \geq \frac{P_2}{2} \sqrt{1 + \mu^2} = T_0$, а при $\alpha \leq \arctg\left(\frac{1}{\mu}\right)$ ответы для T_{min} получаются заведомо меньше T_0 .

Численное решение задачи является простым исследованием неравенства, поэтому нашей задачей является сравнение полученных областей в ПК ADAMS с областями, полученными в результате точного решения.

Численное решение имеет 2 варианта (разные массы тела человека и груза) – рис. 9 и 10, приведенные для большей наглядности в конце статьи. Граница численных решений показана зелёным цветом, а искомые значения лежат внутри этих границ.

За начало движения бралось два варианта – отличие скорости тел от нуля (красная линия/точки) и отличие ускорений тел от нуля (синяя линия/точки). Как видно из результатов, второй метод даёт более точный результат.

Задача о работе муфты

Одной из приоритетных задач нашего исследования было подтвердить зависимость момента сил трения от относительной скорости для фрикционной муфты (рис. 10).

Два диска поджаты одинаковыми пружинами. К дискам приложены в разных направлениях моменты, увеличивающиеся по времени по линейному закону. В определенный момент времени момент сил трения достигает своего максимального значения, после чего два диска приобретают угловую скорость относительно своего центра масс [9].

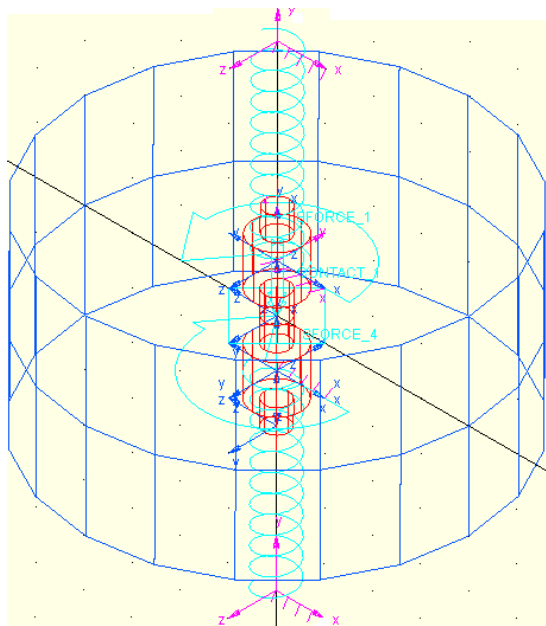


Рис. 11. Моделирование работы муфты в ПК ADAMS

Задача ставилась следующим образом: провести динамический анализ кривошипно-шатунного механизма при наличии муфты предельного момента. Внешний вид системы приведен на рис. 12.

Зависимость момента трения в муфте от времени имеет вид, представленный на рис. 3а.

В данной системе массами обладают кривошип, шатун и ползун. Имеется муфта предельного момента, оба диска которой поджаты одинаковыми силами и не обладают массой и моментами инерции, к ползуну приложена горизонтальная сила, такая, чтобы движение кривошипно-шатунного механизма не имело периодический характер, так это удобно для численного расчёта в пакете Maple. Наша задача сравнить результаты численного счёта и моделирования в ПК ADAMS. В качестве искомой переменной взят угол отклонения от горизонтали кривошипа, который имеет положительное направление против часовой стрелки.

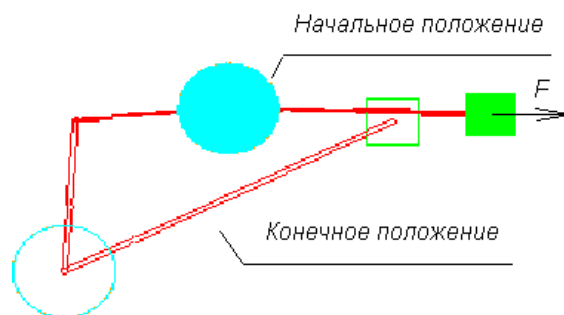


Рис. 12. Внешний вид системы

Сравнение результатов аналитического и численного решения приведено на рис. 13, для наглядности приведен в конце статьи. Как видно из результатов исследования отклонение происходит с ростом времени (накапливается погрешность).

Трение качения в ПК ADAMS

В этой части работы будет рассмотрено моделирование трения качения в ПК ADAMS, в том числе получение коэффициента трения качения, а также исследована зависимость коэффициента трения качения от массы тела при одинаковом радиусе и от радиуса при одинаковой массе.

К цилиндрическому телу 1, находящемуся на плоскости 2, прикладывается возрастающая во времени сила (рис. 14).

Требуется определить момент страгивания тела 1 и вычислить коэффициент трения качения цилиндра из формулы [12]:

$$k = \frac{F_k r}{P}, \quad (4)$$

где F_k – максимальная сила трения (вычисляется по моменту страгивания тела 1 с места); r – радиус цилиндра 1; P – вес тела 1.

Исследовалось 4 тела одинаковой массы – 2 стальных цилиндра и 2 деревянных цилиндра с разными радиусами. Данные по цилиндру и поверхностям: $r_1 = 0.05$ м, $r_2 = 0.1$ м, $\mu_{cm} = 0.2$, $\mu_{дин} = 0.2$, $mg = 60.07$ Н.

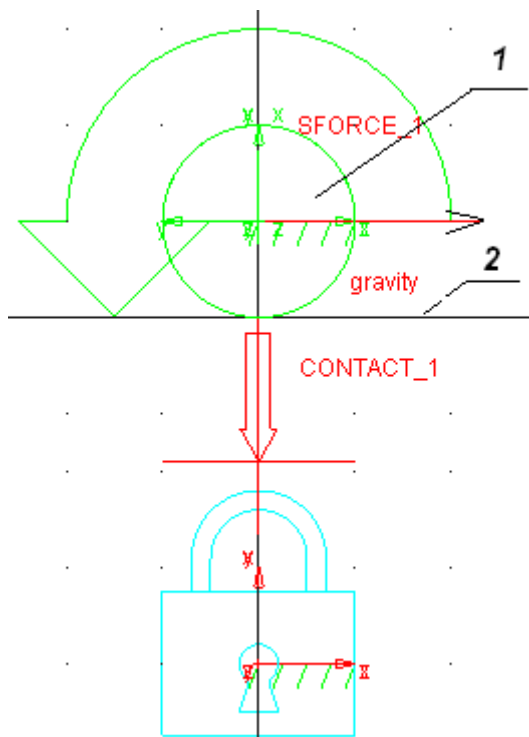


Рис. 14. Моделирование трения качения в ПК ADAMS

Предельный коэффициент трения качения для

$$r_1 = 0.05 \text{ м: } K_{\text{пред1}} = \sqrt{2rd - d^2} = 0.0031 \text{ м};$$

$$r_1 = 0.01 \text{ м: } K_{\text{пред2}} = \sqrt{2rd - d^2} = 0.0044 \text{ м},$$

где d – глубина проникновения.

Материалы поверхностей – сталь по стали, дерево по стали. Данные по контакту в ПК ADAMS приведены в таблице 1.

Таблица 1
Данные по контакту в ПК ADAMS

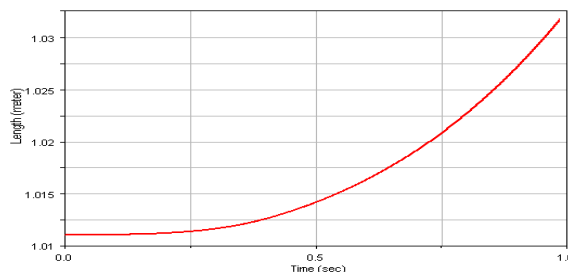
	сталь по стали	дерево по стали
	$r_1 = 0.05 \text{ м}$	
Stiffness	$3.358 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^8$
Force Exponent	2.2	2.2
Damping	$3.358 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^6$
Penetration Depth	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Величина Stiffness вычислена по формуле (1). Величины Force Exponent, Penetration Depth остаются без изменения. Величина Damping вычисляется как 1% от величины Stiffness. Значения коэффициентов трения статического и динамического совпадают.

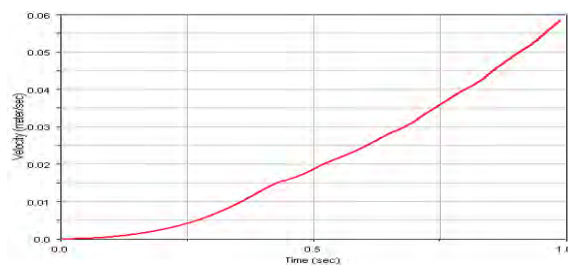
Результаты решения приведены в таблице 2. Пример результатов решения в виде графиков зависимости перемещения, скорости и ускорения тела 1 по оси X от времени для одного из вариантов трения приведены на рис. 14. Зависимость коэффициента трения качения от массы при постоянном радиусе для материала сталь по стали, приведены на рис. 15 и 16.

Таблица 2
Результаты расчетов момента страгивания

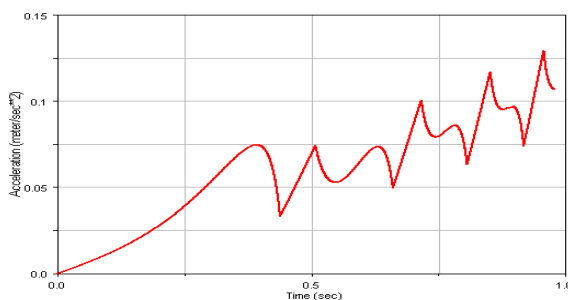
	сталь		дерево	
	$r_1 = 0.05 \text{ м}$	$r_1 = 0.1 \text{ м}$	$r_1 = 0.05 \text{ м}$	$r_1 = 0.1 \text{ м}$
$t, \text{ с}$	0.3234	0.1765	0.1365	0.076
$F_k, \text{ Н}$	0.3234	0.1765	0.1365	0.076
$k, \text{ М}$	0.00027	0.00029	0.00011	0.00012



а)



б)



в)

Рис. 14. Зависимость перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) тела 1 по оси X от времени

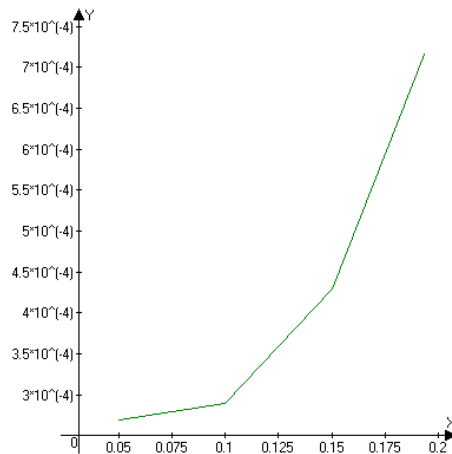


Рис. 15. Зависимость коэффициента трения качения от радиуса при постоянной массе

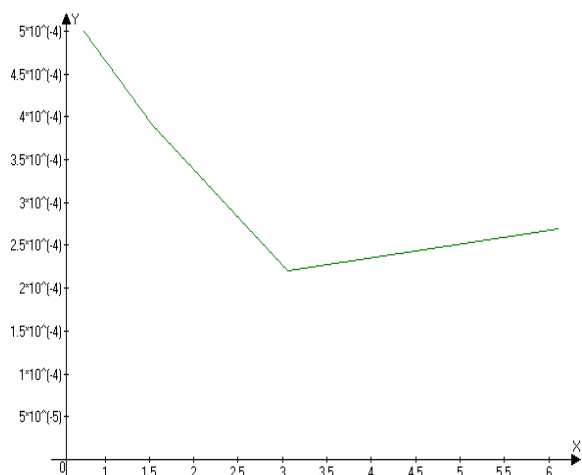


Рис. 16. Зависимость коэффициента трения качения от массы при постоянном радиусе

Заключение

Результаты проведённых расчётов показывают:

1. В ПК ADAMS изначально предполагается наличие трения качения (по умолчанию), поэтому необходимость вводить его самостоятельно отпадает.
2. Коэффициент трения качения, вводимый по умолчанию в ПК ADAMS, различен для разных материалов, зависит от массы тела и радиуса кривизны.
3. Все коэффициенты трения качения оказываются значительно меньше своих предельных коэффициентов трения качения.

Авторы статьи благодарят Плотникова Александра Михайловича за руководство и вклад в развитие специальности «Прикладная механика», а также кафедру ТМ и СМ СПбГМУ за предоставленную возможность использования лицензионной версии ПК ADAMS.

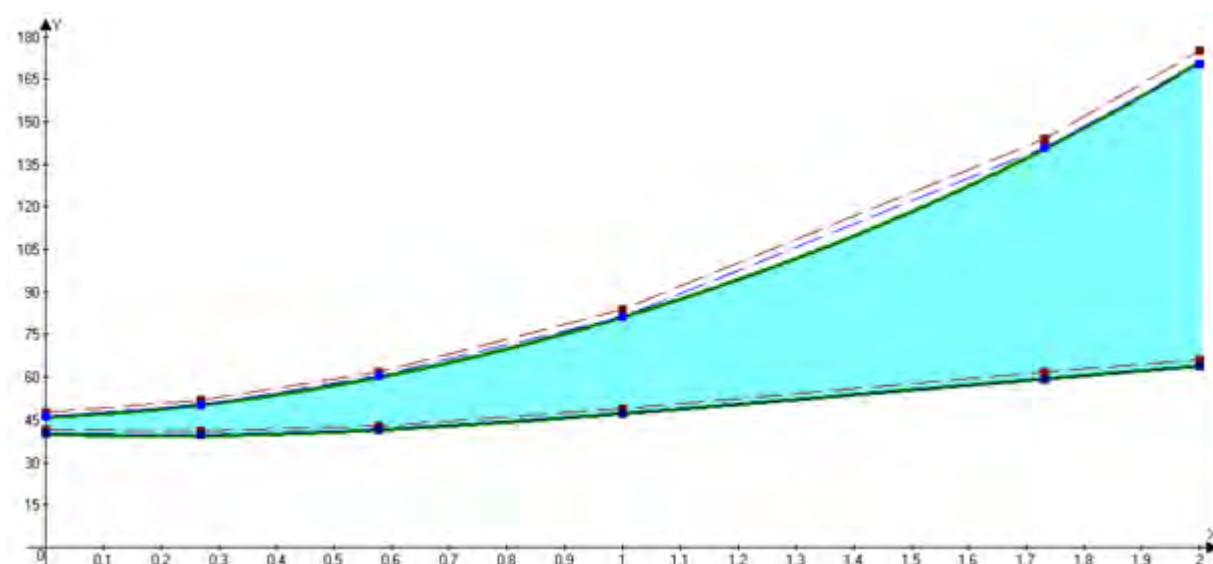


Рис. 9. Результаты решения задачи о грузе на веревке (п. 2.2) $m_1 > m_2$

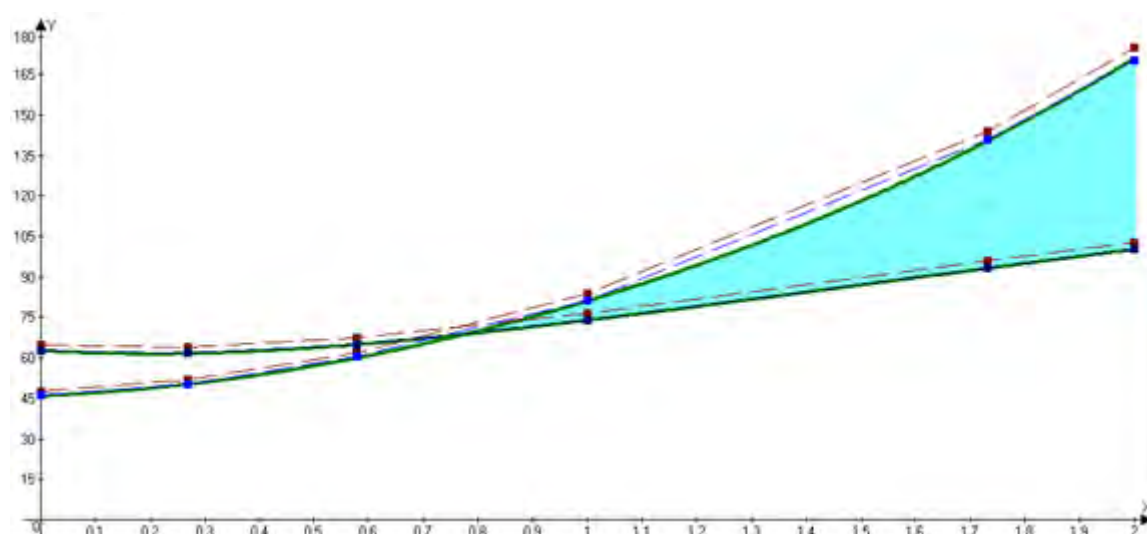


Рис. 10. Результаты решения задачи о грузе на веревке (п. 2.2) $m_1 \leq m_2$

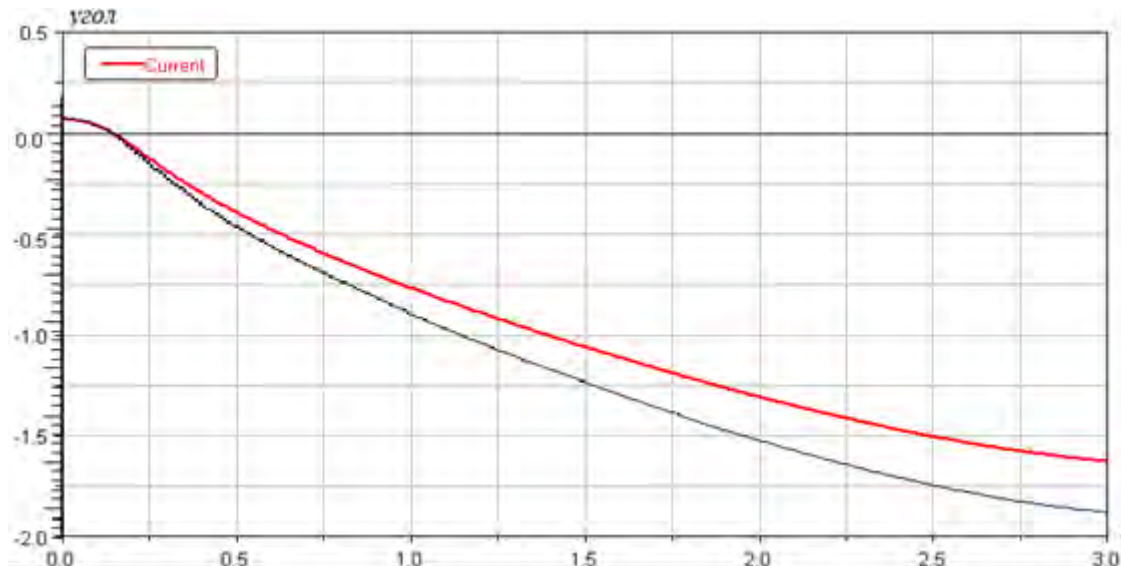


Рис. 13. Зависимость изменения угла отклонения от горизонтали кривошипа во времени, полученная в ПК ADAMS

Литература

1. Никонов С.А., Матюков А.А., Островская Н.В. Особенности виртуального моделирования динамических процессов на примере расчета привода с помощью ПК «ADAMS» // Морские интеллектуальные технологии, № 2(40) Т. 1, 2018, С. 160–165.
2. Никонов С.А., Матюков А.А., Островская Н.В. Особенности виртуального моделирования динамических процессов в механических системах с удерживающими связями с помощью ПК «ADAMS» // Морские интеллектуальные технологии. № 4 (42) Т.1, 2018, С. 223-228.
3. Лесных К.А., Никонов С.А., Островская Н.В. Моделирование статических и динамических расчетов приводов механизмов на примере устройства выдвижения приборного блока с помощью ПК «ADAMS» // Морские интеллектуальные технологии. № 4 (46) Т.1, 2019, С. 205-211.
4. «Виртуальная разработка изделий – технологии XXI века» - методическая литература представительства MSC.Software.
5. Первозванский А.А. Трение - сила знакомая, но таинственная // Сборник статей Соросовского Образовательного журнала, 1998.
6. Гура Г. С. Свободное и несвободное движение тел, 2007.
7. Колесников К.С. Курс теоретической механики. Учебник для вузов / В. И. Дронг, В. В. Дубинин, М. М. Ильин и др.; Под общ. ред. К. С. Колесникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 736 с.
8. Розенблат Г.М., Механика в задачах и решениях, 2004.
9. Ле Суан Ань. Динамика систем с кулоновым трением, 1999.
10. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977.

References

1. Nikonov S.A., Matyukov A.A., Ostrovskaya N.V. Osobennosti virtual'nogo modelirovaniya dinamicheskix processov na primere rascheta privoda s pomoshh'yu PK «ADAMS». Morskije intellektual'ny'e texnologii. № 2(40) Т. 1. 2018. PP. 160–165.
2. Nikonov S.A., Matyukov A.A., Ostrovskaya N.V. Osobennosti virtual'nogo modelirovaniya dinamicheskix processov v mexanicheskix sistemax s uderzhivayushhimi svyaziyami s pomoshh'yu PK «ADAMS» // Morskije intellektual'ny'e texnologii. 2018 . Т. 1. № 4 (42). PP. 223-228.
3. Lesny`x K.A., Nikonov S.A., Ostrovskaya N.V. Modelirovanie staticheskix i dinamicheskix raschetov privodov mexanizmov na primere ustrojstva vy`dvizheniya pribornogo bloka s pomoshh'yu PK «ADAMS» // Morskije intellektual'ny'e texnologii. № 4 (46) Т.1, 2019, S. 205-211.
4. «Virtual'naya razrabotka izdelij – texnologii XXI veka» - metodicheskaya literatura predstavi-tel'stva MSC.Software.
5. Pervozvanskij A.A. Trenie - sila znakomaya, no tainstvennaya // Sbornik statej Sorosovskogo Obra-zovatel'nogo zhurnala, 1998.
6. Gura G. S. Svobodnoe i nesvobodnoe dvizhenie tel, 2007.
7. Kolesnikov K.S. Kurs teoreticheskoy mexaniki. Uchebnik dlya vuzov / V. I. Drong, V. V. Dubinin, M. M. Il'in i dr.; Pod obshh. red. K. S. Kolesnikova. M.: Izd-vo MGTU im. N. E`. Baumana, 2005. 736 с.
8. Rozenblat G.M., Mexanika v zadachax i resheniyax, 2004.
9. Le Suan An`. Dinamika sistem s kulonovy`m treniem, 1999.
10. Kragel'skij I.V., Doby`chin M.N., Kombalov V.S. Osnovy` raschetov na trenie i iznos. M.: Mashino-stroenie, 1977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Семен Анатольевич Никонов, аспирант, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, e-mail: nikonov_smtu@mail.ru

Надежда Владимировна Островская, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

Кир Александрович Лесных, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 198303, Санкт-Петербург, пр. Стачек, д. 105-2-1159, e-mail: leslas@bk.ru

Semyon A. Nikonov, postgraduate, the Assistant at the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Material, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nikonov_smtu@mail.ru

Nadezda V. Ostrovskaya, Ph.D. (Eng), the Assistant Professor at the Department of Structural Mechanics, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

Kir A. Lesnyh, postgraduate, Saint-Petersburg State Marine Technical University, pr. Stachek, 105-2-1159, Saint-Petersburg, 198303, Russian Federation, e-mail: leslas@bk.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 539.43:629.57

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.044>

Математическое моделирование распространения усталостных трещин и оценка ресурса алюминиевых конструкций с прорезным сварным швом

Г.Б. Крыжевич^{1,2} e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru, А.Р. Филатов² e-mail: st024540@student.spbu.ru

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

Аннотация Объектом исследования является конструкция верхней палубы соединительного моста высокоскоростного катамарана, выполненного из алюминиевого сплава 1561 (AMg61). Высокая плотность компоновки моста технологически не позволяет выполнять приварку рёбер жёсткости к настилу верхней палубы непрерывным сварным швом.

Целью работы является расчётная оценка усталостной трещиностойкости конструкции верхней палубы при выполнении сварки прорезным сварным швом. Указанная оценка выполнена на основе эмпирического закона Париса – Эрдогана. При этом поскольку конструкция верхней палубы находится в сложном напряжённом состоянии, требуется учёт совместного влияния всех трёх механизмов роста трещин. В результате расчёта получены зависимости длин трещин и коэффициентов интенсивности напряжений от числа циклов нагружения, а также характер роста трещин. Выявлено, что доминирующим механизмом роста трещин является механизм среза, а не отрыва или сдвига. Показано, что прорезные сварные швы могут быть использованы в слабонагруженных алюминиевых конструкциях.

Ключевые слова: трещиностойкость, усталость, долговечность, механика разрушения, алюминиевые конструкции, прорезной сварной шов

Mathematical modeling of the fatigue cracks propagation and fatigue life estimation of aluminum structures with slot welds

Gennady B. Kryzhevich¹ e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru, Anton R. Filatov² e-mail: st024540@student.spbu.ru

¹State marine technical university of Saint-Petersburg, ²Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract The object of research is the structure of the upper deck of the connecting bridge of a high-speed catamaran, made of 1561 (AMg61) aluminum alloy. The high density of the bridge layout technologically does not allow welding of the stiffeners to the upper deck flooring with a continuous weld. The aim of the work is to estimate the fatigue crack resistance of the upper deck structure when welding with a slot weld. The specified estimate is based on the empirical Paris – Erdogan equation. In this case, since the structure of the upper deck is in a complex stress state, it is required to take into account the joint influence of all three mechanisms of crack growth. As a result of the calculation, the dependences of the crack lengths and equivalent stress intensity factors on the number of loading cycles, as well as the nature of crack growth. It has been revealed that the dominant mechanism of crack growth is the tearing mode, not opening or shearing mode. It is shown that slot welds can be used in lightly loaded aluminum structures.

Key words: crack growth, fatigue life, fracture mechanics, aluminum structures, slot weld

Введение

Объектом исследования является алюминиевая конструкция верхней палубы (ВП) соединительного моста (СМ) скоростного катамарана проекта Esovolt 3.0, один из вариантов которой показан на рис. 1. Шпация рёбер жёсткости равна 200 мм, а шпация бимсов – 800 мм. В табл. 1 представлены значения размеров связей. Высокая плотность компоновки не позволяет выполнять приварку настила ВП непрерывным сварным швом, поэтому предложено выполнять соединение настила с подкрепляющими его рёбрами жёсткости прорезным сварным швом длиной 70 мм и шагом 50 мм, а с бимсами и поперечными переборками – прорезным сварным швом длиной 40 мм и шагом 70 мм.

Использование прорезных сварных швов (см. рис. 2) фактически означает наличие начальных трещин – пустот в промежутках между соседними швами. В условиях циклического воздействия внешней нагрузки эти трещины могут расти, что в конечном итоге может привести к потере герметичности или, что хуже, к разрушению конструкции ВП. Также необходимо отметить, что прорезные сварные швы запрещены Правилами РМРС [1].

Целью настоящей работы является расчётная оценка усталостной трещиностойкости конструкции ВП при выполнении сварки настила с рёбрами жёсткости и бимсами прорезным сварным швом.

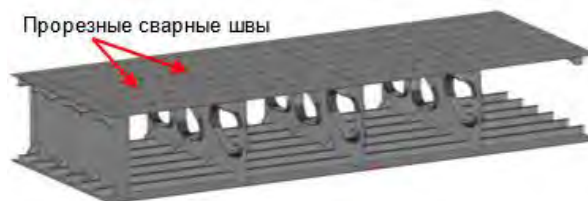


Рис. 1. 3D-модель части СМ алюминиевого катамарана

Таблица 1

Настил ВП	S3
Рёбра жёсткости ВП	T45×40×3×3
Бимсы ВП	T100×65×3×3
Поперечная переборка	S3

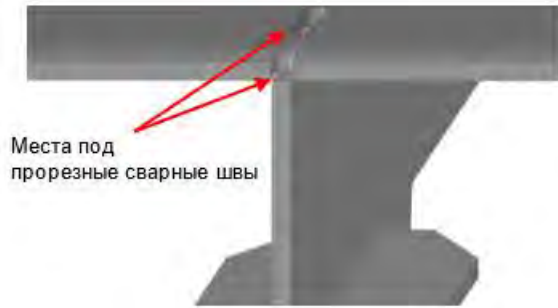


Рис. 2. Прорезной сварной шов

1. Постановка задачи и методика решения

Для достижения поставленной цели с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ANSYS Workbench в два этапа решалась задача циклического нагружения ВП.

На первом этапе выполнялось нагружение глобальной конечноэлементной (КЭ) модели части СМ (см. рис. 3). Материал полагался линейным и изотропным, его свойства приведены в табл. 2. В качестве граничных условий было принято свободное опирание на три переборки: носовую, кормовую и переборку в ДП (см. рис. 4). В качестве циклической нагрузки на ВП был принят вес от 100 кг пассажира, действующий на пятне контакта размером 5×5 см. Рассматривалось три варианта расположения пятна нагрузки (см. рис. 5):

- по центру пластины;
- на четверти ширины пластины;
- посередине пролёта ребра жёсткости.

При этом задача решалась в геометрически нелинейной постановке и учитывался контакт настила ВП с рёбрами жёсткости в местах неперевара.

Таблица 2

Механические свойства листов из алюминиевого сплава 1561 (AMg61) [2]

Тип элемента	E , ГПа	ν	ρ , т/м ³
Лист S0,8–3,5 мм	70	0,32	2,65

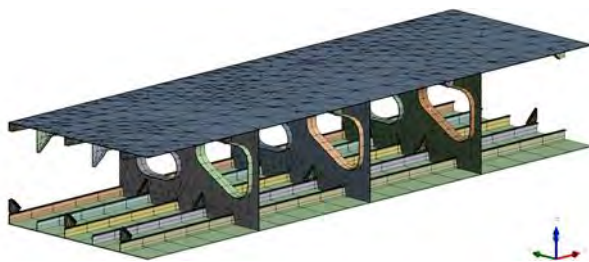


Рис. 3. Глобальная КЭ модель части СМ

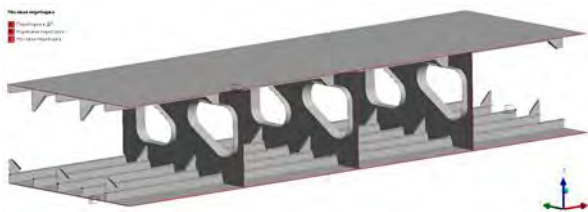


Рис. 4. Граничные условия для глобальной КЭ модель части СМ

На втором этапе с помощью метода подмоделирования выполнялся расчёт трещиностойкости локальной КЭ модели части ВП,

содержащей трещину в соединении настила с ребром жёсткости (см. рис. 6). Рассматривалось шесть различных положений трещин (см. рис. 7). Материал, как и на первом этапе, полагался линейным и изотропным (см. табл. 2). Граничными условиями в локальной КЭ модели являлись перемещения, полученные при расчёте глобальной КЭ модели (см. рис. 8). Давление от пятна нагрузки попадает только на трещины 2 и 5, причём в единственном расчётном случае – нагружение ребра жёсткости посередине его пролёта. Задачи на этом этапе, в отличие от предыдущего, решались в линейной постановке, а оценка напряжённого состояния у фронта трещин выполнялась на основе коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) согласно линейной механике разрушения.

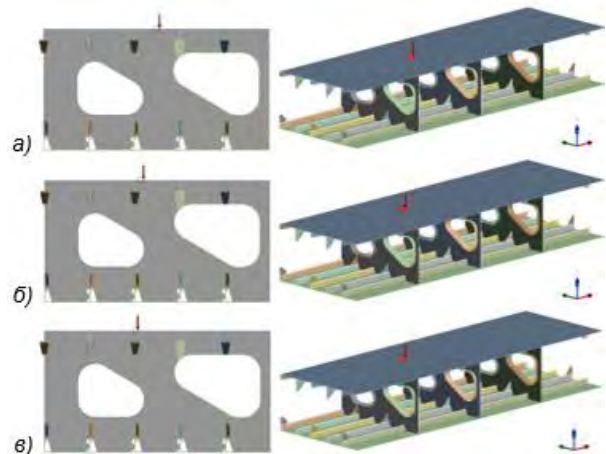


Рис. 5. Варианты приложения давления: а) по центру пластины; б) на четверти ширины пластины; в) посередине пролёта ребра жёсткости

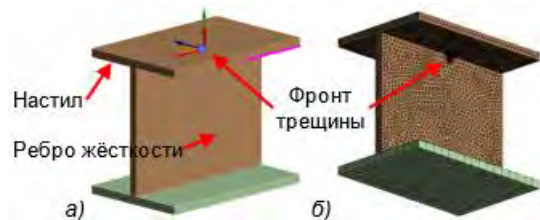


Рис. 6. Локальная модель части ВП: а) 3D-модель с местной СК трещины; б) КЭ модель со сгущением сетки у фронта трещины

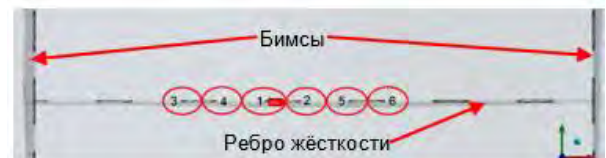


Рис. 7. Положения расчётных трещин

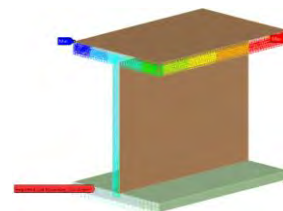


Рис. 8. Граничные условия для локальной КЭ модели части ВП

Сначала для проверки статической прочности решалась задача однократного нагружения ($N = 1$). Оценка статического роста трещин выполнялась с помощью силового критерия

$$K_{eq} = K_{Ic}, \quad (1)$$

где K_{eq} – эквивалентный КИН, в качестве которого был принят КИН плоских трещин смешанного типа I-II по критерию максимальных окружных напряжений σ_θ , предложенный Эрдоганом и Сихом [3, 4]:

$$K_{eq}^{I-II} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I (1 + \cos \theta_0) - 3K_{II} \sin \theta_0], \quad (2)$$

K_{Ic} – критический КИН (см. табл. 3);

θ_0 – угол роста трещины (см. рис. 9) [5]:

$$\theta_0 = 2 \arctg \left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \right). \quad (3)$$

Знак в (3) выбирается дабы максимизировать (2).

Таблица 3

Минимальные значения характеристик трещиностойкости алюминиево-магниевых сплавов на границе сплавления и в ЗТВ [6]

Марка сплава	K_{Ic} , МПа·√мм	J_c , Н/мм
1550М (АМг5)	780	30
1565ЧМ (АМг65)	1060	51

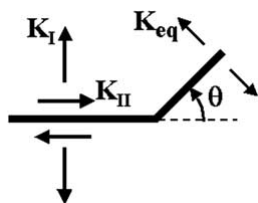


Рис. 9. Угол роста плоских трещин смешанного типа I-II [5]

Затем для проверки усталостной прочности решалась задача многократного нагружения ($N > 1$). Оценка усталостного роста трещин выполнялась с помощью эмпирического закона Пэриса – Эрдогана, связывающего скорость роста трещины da/dN с размахом КИН за цикл ΔK :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad (4)$$

где C, m – константы материала (см. табл. 3).

Для трещин смешанного типа I-II при плоском напряжённом состоянии в формуле (4) используется размах эквивалентного КИН ΔK_{eq} по аналогии с (2):

$$\Delta K_{eq} = \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} [\Delta K_I (1 + \cos \theta_0) - 3\Delta K_{II} \sin \theta_0], \quad (5)$$

где ΔK_I – размах КИН механизма отрыва:

$$\Delta K_I = K_I^{max} - K_I^{min} = (1 - R)K_I^{max}; \quad (6)$$

ΔK_{II} – размах КИН механизма сдвига:

$$\Delta K_{II} = K_{II}^{max} - K_{II}^{min} = (1 - R)K_{II}^{max}; \quad (7)$$

R – коэффициент асимметрии цикла:

$$R = K^{min} / K^{max}. \quad (8)$$

В расчётах был принят отнулевой цикл нагружения, что соответствует $R = 0$ в формуле (8), откуда в (6) и (7) получаем $\Delta K_I = K_I^{max}$ и $\Delta K_{II} = K_{II}^{max}$ соответственно.

Таблица 4

Параметры закона Пэриса – Эрдогана [7]

Материал	C	m
АМг	$6,09 \cdot 10^{-11}$	2,70

В процессе расчёта усталостного роста трещин на основе минимального размера конечного элемента у фронта трещины выбирается шаг приращения её длины Δa , после чего из закона (4) определяется соответствующее этому удлинению приращение числа циклов нагружения ΔN . При этом программа автоматически перестраивает геометрию трещины и КЭ сетку.

2. Результаты расчёта

В табл. 4 представлены результаты расчёта глобальной КЭ модели части СМ. Если прогибы во всех случаях близки, то по эквивалентным напряжениям последний случай существенно выделяется.

Таблица 4

Результаты расчёта глобальной КЭ модели части СМ

Нагружение	σ_{eq} , МПа	u_z , мм
По центру пластины	11,1	0,22
На четверти пластины	11,2	0,24
Посередине ребра жёсткости	20,0	0,27

В табл. 5-табл. 7 приведены значения КИН, полученные при расчёте статической прочности локальных КЭ моделей трещин во всех случаях нагружения. Как видно, ни в одной трещине эквивалентный КИН K_{eq}^{I-II} не превосходит критический КИН, что говорит об отсутствии статического разрушения по смешанному механизму I-II. Однако для всех трещин характерно наличие большого значения K_{III} , следовательно, для более полной оценки статической прочности при расчёте K_{eq} необходим учёт всех трёх механизмов роста трещин. При этом для пространственных трещин смешанного типа I-II-III требуется введение пары углов (θ, φ), определяющих направление их роста (см. рис. 10). Подобный учёт выполнен, например, в работах [8, 9], где предполагается, что трещина растёт в направлении, перпендикулярном главному напряжению σ_1 в цилиндрической СК (см. рис. 11). Это приводит к следующему выражению для определения эквивалентного КИН:

$$K_{eq}^{I-II-III} = \frac{1}{4} \cos \frac{\theta_0}{2} \left\{ K_I (1 + \cos \theta_0) - 3K_{II} \sin \theta_0 + \sqrt{[K_I (1 + \cos \theta_0) - 3K_{II} \sin \theta_0]^2 + 16K_{III}^2} \right\}, \quad (9)$$

где θ_0 – угол, вычисляемый по формуле (3).

Из представленных в табл. 5-табл. 7 результатов следует, что по критерию $K_{eq}^{I-II-III}$ все трещины являются статически стабильными, т.е. отсутствует статическое разрушение по смешанному механизму I-II-III.

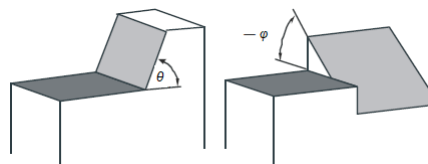


Рис. 10. Углы роста пространственных трещин смешанного типа I-II-III [4]

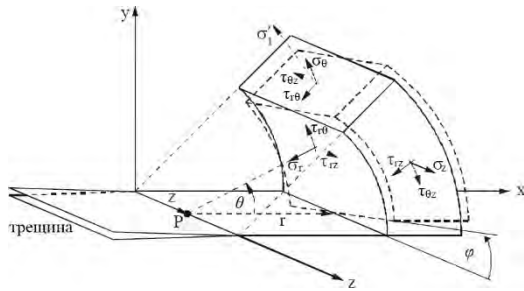


Рис. 11. Цилиндрическая СК и компоненты напряжений около вершины P пространственного фронта трещины [4]

Таблица 5

КИН в случае однократного приложения пятна нагрузки по центру пластины

№ трещины	K_I , МПа·√мм	K_{II} , МПа·√мм	K_{III} , МПа·√мм	K_{eq}^{I-II} , МПа·√мм	$K_{eq}^{I-II-III}$, МПа·√мм
1	2.5	2.4	56.9	4.4	53.3
2	-1.0	-2.5	24.9	2.4	20.5
3	-2.6	3.5	76.8	2.8	58.0
4	4.5	-4.3	80.1	6.9	76.7
5	-2.1	-2.7	33.5	2.1	25.7
6	3.6	4.5	83.8	7.5	77.7

Таблица 6

КИН в случае однократного приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины

№ трещины	K_I , МПа·√мм	K_{II} , МПа·√мм	K_{III} , МПа·√мм	K_{eq}^{I-II} , МПа·√мм	$K_{eq}^{I-II-III}$, МПа·√мм
1	3.8	-5.0	93.0	8.2	85.9
2	-0.5	-2.6	18.1	2.9	15.9
3	0.4	-3.6	95.4	4.0	80.9
4	7.6	4.9	89.8	10.7	88.4
5	-5.7	-3.2	61.1	1.5	38.2
6	4.3	6.0	107.0	9.5	98.7

Таблица 7

КИН в случае однократного приложения пятна нагрузки посередине пролёта ребра жёсткости

№ трещины	K_I , МПа·√мм	K_{II} , МПа·√мм	K_{III} , МПа·√мм	K_{eq}^{I-II} , МПа·√мм	$K_{eq}^{I-II-III}$, МПа·√мм
1	0.5	11.6	108.7	13.6	96.3
2	-16.3	-2.8	21.5	0.3	6.8
3	-5.3	8.5	136.2	7.2	106.0
4	9.2	-6.0	124.6	13.2	121.6
5	-5.3	-7.4	102.6	6.0	79.0
6	6.7	8.4	139.1	13.9	130.0

На рис. 12-рис. 14 показаны полученные при расчёте усталостной прочности графики роста трещин в локальных КЭ моделях, а на рис. 15-рис. 17 – графики изменения размаха эквивалентного КИН в точке фронта с его максимальным значением. Как видно, во всех расчётных случаях быстрее всего растут трещины 4 и 6, причём в них же наблюдается наибольший размах эквивалентного КИН. Поскольку ни в одной трещине ΔK_{eq} не превзошёл K_{Ic} , все они на протяжении своего усталостного роста являются стабильными, т.е. находятся на участке устойчивого роста. При этом динамика изменения ΔK_{eq} говорит о релаксации почти всех трещин, кроме трещины 1 в случае приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины – здесь через $3,8 \cdot 10^8$ циклов её

длина составляет уже 6,5 мм, после чего ΔK_{eq} начинает расти. Поэтому можно утверждать, что по критерию для плоских трещин смешанного типа I-II все они выдержат минимум 10^8 циклов нагружения.

За 25-летний срок эксплуатации ожидаемое число рейсов планируется на уровне 4000. При полной загрузке общее число пассажиров и экипажа составляет 100 человек. За рейс от каждого человека ожидается 10 циклов нагружения. Следовательно, за 25 лет полное ожидаемое число циклов нагружения составляет $N = 4 \cdot 10^6 \leq 10^7$, что существенно меньше расчётной усталостной долговечности $N_f \geq 10^8$.

Давление по центру пластины

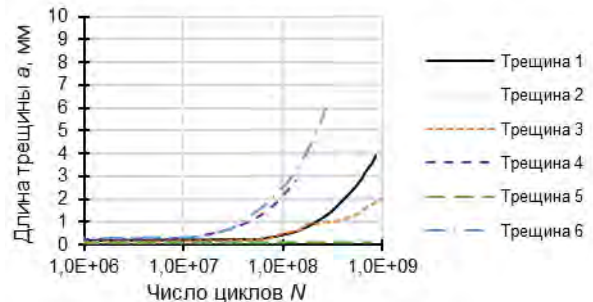


Рис. 12. Рост трещин в случае приложения пятна нагрузки по центру пластины

Давление на четверти ширины пластины

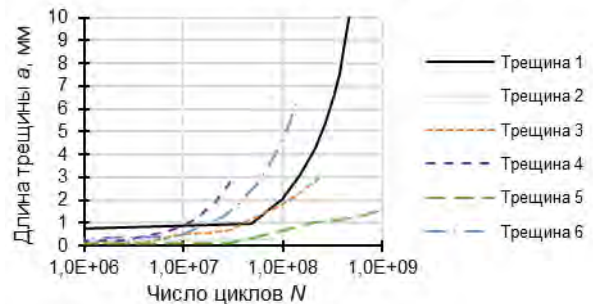


Рис. 13. Рост трещин в случае приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины

Давление посередине ребра жёсткости

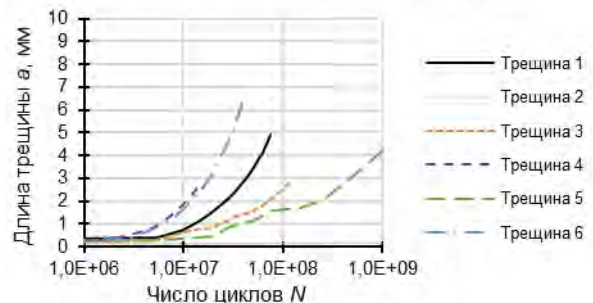


Рис. 14. Рост трещин в случае приложения пятна нагрузки посередине пролёта ребра жёсткости

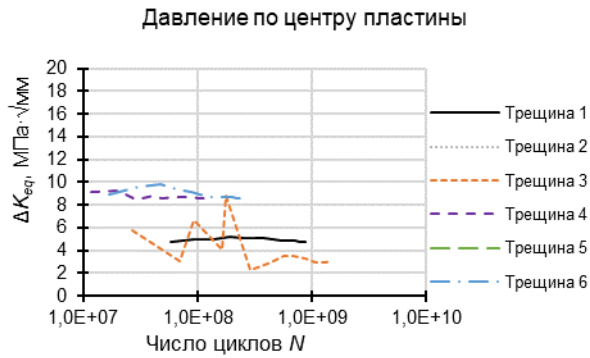


Рис. 15. Изменение размаха эквивалентного КИН в случае приложения пятна нагрузки по центру пластины

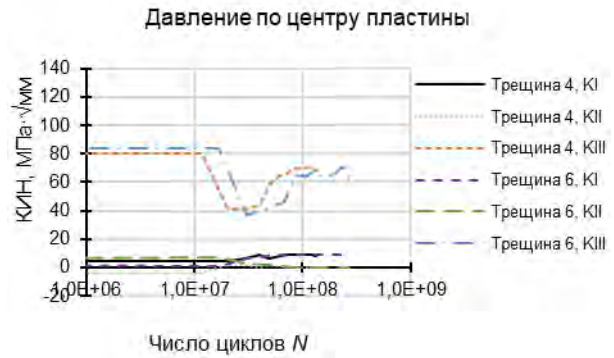


Рис. 18. Изменение КИН в случае приложения пятна нагрузки по центру пластины

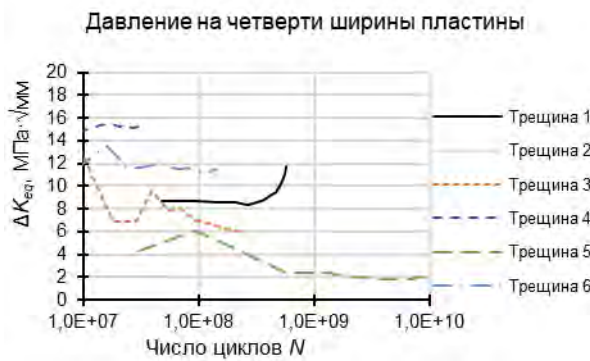


Рис. 16. Изменение размаха эквивалентного КИН в случае приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины



Рис. 19. Изменение КИН в случае приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины

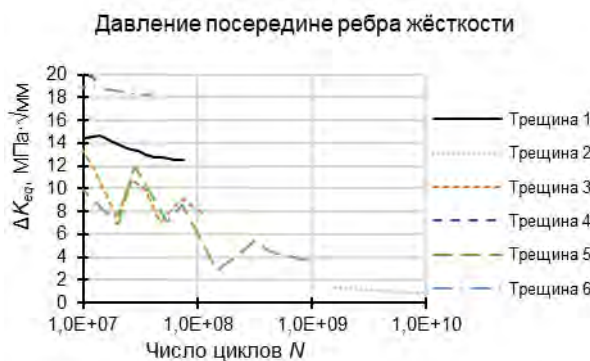


Рис. 17. Изменение размаха эквивалентного КИН в случае приложения пятна нагрузки посередине пролёта ребра жёсткости

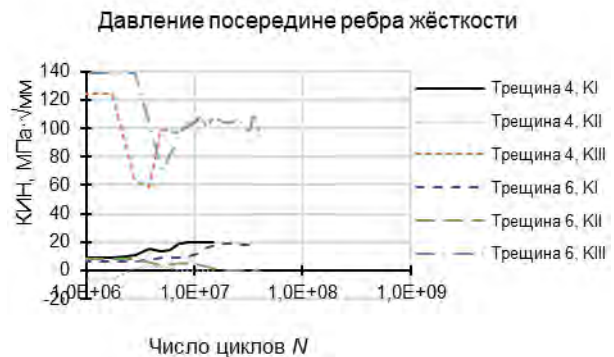


Рис. 20. Изменение КИН в случае приложения пятна нагрузки посередине пролёта ребра жёсткости

На рис. 18-рис. 20 показаны графики изменения КИН трещин 4 и 6 в процессе их усталостного роста, откуда видно, что K_I увеличивается, K_{II} , наоборот, уменьшается и становится околонулевым, а K_{III} колеблется около среднего значения, которое в 5 раз превосходит максимум, достигнутый K_I . Таким образом, наибольший вклад в рост трещин вносит именно механизм среза, а не отрыва или сдвига. Следовательно, при определении $\Delta K_{эф}$ в формуле (5) требуется учёт ΔK_{III} , который можно выполнить по аналогии с формулой (9).

На рис. 21-рис. 23 показаны усталостные трещины в конце расчёта для каждого случая нагружения. Как видно, характер развития трещин не зависит от места приложения нагрузки, последнее влияет лишь на скорость роста трещин. При этом трещины 1, 4 и 6 растут вглубь стенки ребра жёсткости под углом около 60° , и их фронт перпендикулярен поверхности стенки; трещина 2 также растёт вглубь стенки ребра жёсткости, но под углом 45° , и её фронт уже не перпендикулярен поверхности стенки; а вот трещины 3 и 5 – наоборот, растут в толщину настила ВП, однако к концу расчёта они не выходят на наружную поверхность, т.е. герметичность не нарушается.

Выводы

С использованием МКЭ выполнены численные расчёты статического и усталостного роста трещин в алюминиевой конструкции ВП. Результаты расчётов статической прочности показали, что как по критерию для плоских трещин смешанного типа I-II, так и по критерию для пространственных трещин смешанного типа I-II-II все они являются статически прочными и не имеют роста после однократного нагружения. Результаты расчётов усталостной прочности показали, что все трещины оказываются стабильными вплоть до 10^8 циклов нагружения, а эквивалентный КИН K_{eq}^{I-II} на их фронте не превосходит минимальный критический КИН для алюминиево-магниевых сплавов на границе сплавления и в ЗТВ, что позволяет с большим запасом гарантировать работоспособность конструкции ВП на протяжении 25-летнего срока эксплуатации судна при ожидаемом числе циклов нагружения на уровне $4 \cdot 10^6$. Выявлено, что как при статическом, так и при усталостном расчёте наибольшие значения принимает не K_I или K_{II} , а K_{III} , что говорит о необходимости его учёта при определении эквивалентного КИН и направления роста трещин. Подобный учёт предлагается выполнять по критерию максимальных главных напряжений, предложенному Шельманном и соавт.

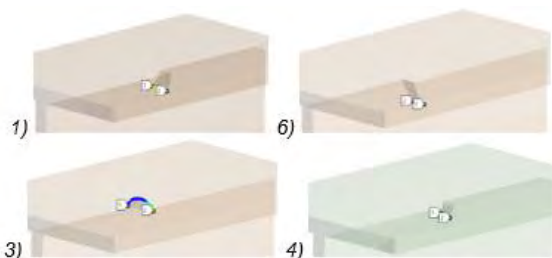


Рис. 21. Усталостные трещины в случае приложения пятна нагрузки по центру пластины

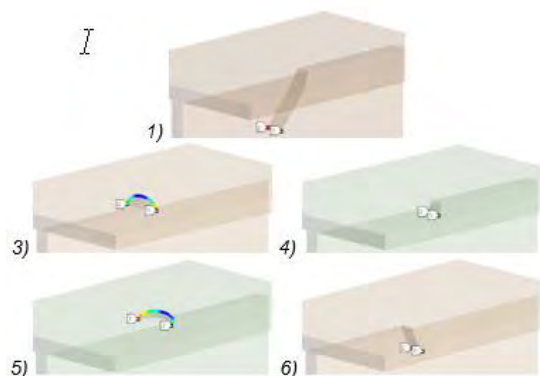


Рис. 22. Усталостные трещины в случае приложения пятна нагрузки на четверти ширины пластины

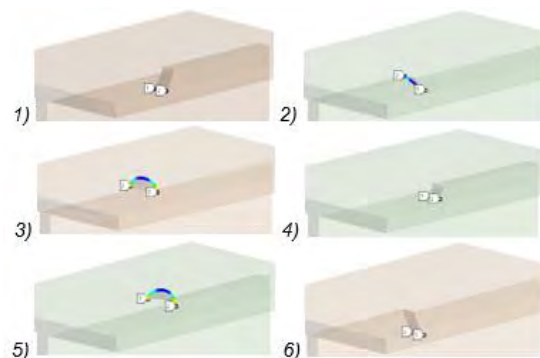


Рис. 23. Усталостные трещины в случае приложения пятна нагрузки посередине пролёта ребра жёсткости

Литература

1. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. 197 с.
2. Материалы для судостроения и морской техники. Справочник в 2-х томах. Том 2. СПб.: НПО "Профессионал", 2010. 663 с.
3. Erdogan F., Sih G.C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. Journal of Basic Engineering. 1963; vol. 85, no. 4: 519-525.
4. Richard H.A. Theoretical crack path determination. International conference on fatigue crack paths. Parma, 2003.
5. Meggiolaro M.A., Miranda A.C.O., Castro J.T.P., Martha L.F. Stress intensity factor equations for branched crack growth. Engineering Fracture Mechanics. 2005. Vol. 72, no. 17. P. 2647-2671.
6. Булгаков А.А., Кноринг С.Д., Крыжевич Г.Б., Шапошников В.М. Экспериментальное исследование влияния криогенных температур на характеристики прочности и трещиностойкости основного металла и сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов марок 1565чМ и 1550М. Труды Крыловского государственного научного центра. 2014; 4(367): 109-116.
7. Петин С.В. Механика усталостного разрушения судокорпусных конструкций. Учебное пособие. Л.: Издательство ЛКИ, 1985. 133 с.
8. Schöllmann M., Kullmer G., Fulland M., Richard H.A. A new criterion for 3D crack growth under mixed mode (I+II+III) loading. Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture. 2001; vol. 2: 589-596.

9. Schöllmann M., Richard H.A., Kullmer G., Fulland M. A new criterion for the prediction of crack development in multiaxially loaded structures. *International Journal of Fracture*. 2002; 117: 129-141.

References

1. Rules for the Classification and Construction of High-Speed Craft. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2018. 180 p.
2. Materialy dlya sudostroeniya i morskoi tekhniki. Spravochnik. Tom 2. [Materials for shipbuilding and marine facilities. Reference book. Vol. 2]. St. Petersburg: Professional, 2010. 663 p (in Russian).
3. Erdogan F., Sih G.C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*. 1963; vol. 85, no. 4: 519-525.
4. Richard H.A. Theoretical crack path determination. International conference on fatigue crack paths. Parma, 2003.
5. Meggiolaro M.A., Miranda A.C.O., Castro J.T.P., Martha L.F. Stress intensity factor equations for branched crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005; vol. 72, no. 17: 2647-2671.
6. Bulgakov A., Knoring S., Kryzhevich G., Shaposhnikov V. Experimental study of cryogenic temperatures effect upon strength and fracture resistance of base metal and welding joints for Al-Mg alloys 1565ChM and 1550M. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2014; 4(367): 109-116 – (in Russian).
7. Petinov S.V. *Mekhanika ustalostnogo razrusheniya sudokorpusnykh konstrukcii* [Fatigue fracture mechanics of ship hull structures]. L.: LKI, 1985. 133 p. (in Russian).
8. Schöllmann M., Kullmer G., Fulland M., Richard H.A. A new criterion for 3D crack growth under mixed mode (I+II+III) loading. *Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*. 2001; vol. 2: 589-596.
9. Schöllmann M., Richard H.A., Kullmer G., Fulland M. A new criterion for the prediction of crack development in multiaxially loaded structures. *International Journal of Fracture*. 2002; 117: 129-141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Брониславович Крыжевич, доктор технических наук, профессор, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Gennadiy B. Kryzhevich, Dr.Sci. (Eng), Professor, head of sector, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation; Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotmaskaya, 3, St. Petersburg, post code 1960121, Russian Federation, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Антон Романович Филатов, научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: st024540@student.spbu.ru

Anton R. Filatov, researcher, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: st024540@student.spbu.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:

УДК 004.942:004.031.043

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.045>

Гибридное моделирование морских объектов в «потенциальной яме»

Ю.И. Нечаев¹ e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru, О.Н. Петров e-mail: petr_oleg@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассмотрены особенности функционирования системы гибридного моделирования (Hybrid Modeling) динамики морских объектов при возникновении и развитии «потенциальной ямы» в эволюционирующей среде на основе мультипроцессорного программного комплекса. Процедуры построения системы гибридного моделирования выполнены в функциональных пространствах современной теории катастроф. Интеллектуальная поддержка вычислительных операций в системе гибридного моделирования осуществляется на основе современной компьютерной математики и логических моделей нечеткой формальной системы. Геометрическая интерпретация результатов моделирования и динамической визуализации поведения морского объекта в «потенциальной яме» обеспечивается в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing). Приведены примеры реализации разработанной стратегии гибридного моделирования при контроле экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах новых поколений. Рассмотрены динамические картины возникновения «потенциальной ямы» на основе когнитивной карты. Представлены результаты формального концептуального анализа при контроле «потенциальной ямы». **Ключевые слова:** потенциальная яма, морской объект, современная теория катастроф, режим экстренных вычислений

Hybrid modeling of the marine objects in the «potential well»

Yuri I. Nechaev¹ e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru, Oleg N. Petrov¹ e-mail: petr_oleg@mail.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The features of the functioning of the system of hybrid modeling of the dynamics of marine objects during the emergence and development of a "potential well" in an evolving environment based on a multiprocessor software package are considered. The procedures for constructing a hybrid modeling system are carried out in the functional spaces of the modern catastrophe theory. Intellectual support of computational operations in the hybrid modeling system is carried out on the basis of modern computer mathematics and logical models of a fuzzy formal system. Geometric interpretation of the results of modeling and dynamic visualization of the behavior of the marine object in the "potential well" is provided in the urgent computing mode. Examples of the implementation of the developed strategy of hybrid modeling for the control of extreme situations in onboard intelligent systems of new generations are given. The dynamic pictures of the emergence of a "potential well" based on a cognitive map are considered. The results of a formal conceptual analysis during the control of the "potential well" are presented.

Key words: hybrid modeling, potential well, marine object, modern catastrophe theory, urgent computing.

Введение

Теоретический базис формирования возникновения и развития «потенциальной ямы» в нестационарной среде гибридного моделирования (ГМ) динамики морских объектов (МО) рассмотрен в функциональных пространствах современной теории катастроф (СТК) [3]. Процедуры ГМ и динамической визуализации выполнены в мультипроцессорном программном комплексе (МПК) при интеллектуальной поддержке (ИП) базы знаний нечеткой формальной системы (НФС) [3] – [5]. Формальный аппарат стратегических решений реализован на основе функциональных пространств СТК [3] в рамках принципа конкуренции [3] – [5]. Математическое описание эволюционной динамики МО основано на использовании модифицированных уравнений Дуффинга и Матье [3] в режиме экстренных вычислений (УС) [9]. Моделирование и визуализация динамики МО реализуются в интегрированной среде МПК как системы распределенного интеллекта (рис.1).

1. Динамическая модель интерпретации «потенциальной ямы» в среде ГМ

В соответствии с особенностями процедур интерпретации «потенциальной ямы» выделим три среды функционирования вычислительной среды МПК на основе следующих определений (рис.2) [5].

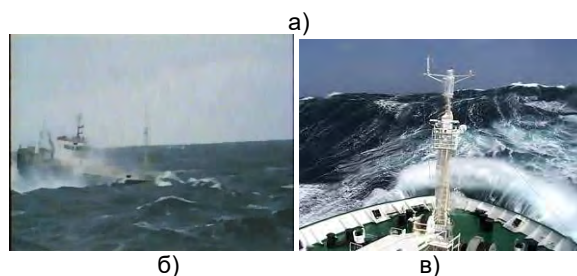


Рис.1. Нестационарная среда поведения МО (а); динамическая визуализация: сильная качка (б), удар волны в носовую оконечность (в)

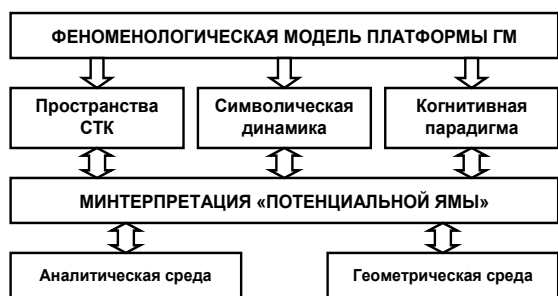


Рис. 2. Формализация моделирования и интерпретации решений в среде ГМ

Определение 1. Замкнутая среда функциональных пространств СТК обеспечивает описание феномена «потенциальной ямы» в среде ГМ. Поведение МО зависит от принятого описания интерпретируемой среды. При этом управляющий модуль системы ИП использует полные знания о среде взаимодействия и ее свойствах. Исходной информацией при формировании процедур интерпретации являются данные измерений и моделирования в виде динамических характеристик взаимодействия. Таким образом, замкнутая среда позволяет получить знания о динамике взаимодействия МО в условиях «потенциальной ямы» для практического использования.

Определение 2. Открытые среды символической динамики представляют возможности математического описания динамики МО в «потенциальной яме» на основе символической математики. Знания о «скрытых» свойствах и динамических характеристиках в таких средах могут накапливаться в процессе функционирования системы ИП, однако при этом не достигается полный уровень описания. Открытый мир, характеризуемый подобной средой взаимодействия, реализует символическое знание о процессах взаимодействия в виде математического описания.

Определение 3. Трансформируемые среды когнитивной парадигмы, в отличие от предыдущих сред при исследовании «потенциальной ямы», могут менять свое поведение. Динамические характеристики и реакции на управляющие воздействия системы ИП определяются в зависимости от тех действий, которые когнитивные образы совершают при интерпретации на основе когнитивных карт. Знания о динамике взаимодействия и математическом описании трансформируемой среды в когнитивных моделях носят временной «исторический» характер.

Если ввести понятие состояния интерпретирующей среды ГМ, характеризуя ее как набор «скрытых» знаний о динамике взаимодействия МО, то замкнутые среды, используемые в пространствах поведения и управления СТК, могут задаваться одним состоянием взаимодействия. Состояния моделей при интерпретации «потенциальной ямы» в открытых средах будут фиксироваться на некоторых «временных» интервалах. Открытая среда может рассматриваться как замкнутая, а смена состояний в процессе эволюции будет происходить за счет появления новых знаний о среде взаимодействия и способах управления, которые изменяют прежние закономерности поведения МО, верные для ранее

фиксированного состояния. В трансформируемых средах процедуры интерпретации «потенциальной ямы» выполняются с учетом смены состояний, которые могут планироваться и инициироваться в зависимости от особенностей эволюционной динамики взаимодействия.

В рамках аксиоматического подхода распознавание нештатного поведения МО в условиях возникновения «потенциальной ямы» реализуется с помощью следующих процедур.

Процедура 1. Выделяются классы нештатного поведения МО и исследуются соответствующие эталонные взаимодействия с использованием базы знаний прецедентов возникновения «потенциальной ямы».

Процедура 2. Производится анализ исследуемой ситуации, на основании которого формируется взаимодействие МО, близкое к классам нештатного поведения.

Процедура 3. Для выделенных классов нештатного поведения формулируется аксиоматический базис в виде последовательности аксиом, соответствующих эталонным траекториям в условиях «потенциальной ямы».

Математическая теория функционального пространства эволюционной динамики определяется системой объектов и отношений в рамках онтологического базиса, а логическая структура интерпретации динамики взаимодействия – на основе фундаментальных положений (аксиом), определяющих эволюционную сложность системы взаимодействия. При таком рассмотрении аналитическая компонента СТК представляется с помощью моделей интерпретации, а геометрическая – в виде различных отображений. Проблема пространства-времени рассматривается на основе меры сложности, учитывающей взаимодействие элементов интерпретируемой ситуации и связи аналитического синтеза с физическими закономерностями.

Задача прогнозирования поведения МО в среде ГМ представляет цепочку преобразований:

$$X_1(T, S) \Rightarrow Y_1(Out), \dots, X_n(T, S) \Rightarrow Y_n(Out), \quad (1)$$

где компоненты $X_1(T, S), \dots, X_n(T, S)$ определяют функции интерпретации на каждом шаге выполнения операций преобразования информации с использованием функции управления, а $Y_1(Out), \dots, Y_n(Out)$ – результаты прогноза исследуемых характеристик системы взаимодействия.

2. Интерпретация «потенциальной ямы» на основе методов символической динамики

Рассмотрим теоретические принципы гибридного моделирования с использованием методов символической динамики. Основная модель, построенная на основе парадигмы нелинейной самоорганизации [1], [5], [6], рассматривает поведение МО в периодически меняющемся потенциальном поле на основе дифференциального уравнения:

$$\theta'' = -Q(\theta, t), \quad (2)$$

где $Q(\theta, t)$ периодически зависит от t . Целью исследования является построение семейства решений уравнения (2) методами символической динамики. Первый шаг состоит в построении отображения Пуанкаре S . Осуществляя переход от S

к фазовому потоку, мы получаем «квазислучайное» семейство траекторий. Стандартные приемы символической динамики позволяют построить решения уравнения (2) с разнообразным поведением, отображающим взаимодействие МО в критических ситуациях в виде пульсирующей «потенциальной ямы» (рис.3).

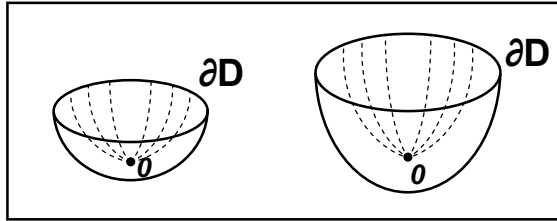


Рис.3. «Потенциальная яма» в задаче оценки поведения МО на волнении

Рассмотрим движение системы в поле с периодически меняющимся потенциалом $U(x, t)$, график которого имеет вид симметричной «потенциальной ямы». Профиль «потенциальной ямы» периодически пульсирует, но качественный характер поведения сохраняется. Сформулируем предложения в терминах функции $Q(\theta, t)$ (силы), а не $U(\theta, t)$ (потенциала). Функция $Q(\theta, t)$ нечетна по θ и 2π -периодична по t , а $Q > 0$ при $\theta > 0$, $Q' \leq 0$ при $\theta > 0^+$, т.е. график решения уравнения (2) как функции от t согнут вниз при $\theta > 0$ и вверх – при $\theta < 0$ (рис.4а).

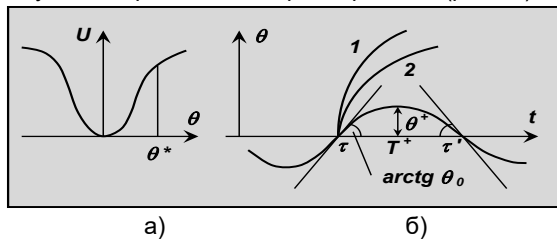


Рис.4. Закономерности изменения пульсирующей «потенциальной ямы»

На основе этих условий решения $\theta(t)$ уравнения (2) требуют, чтобы траектория пересекала секущую поверхность не менее двух раз. Этим свойством обладают не все траектории, поэтому исследуемая функция определена не на всей секущей поверхности и является лишь локальным диффеоморфизмом с областью определения R^+ , а множество значений – R^- . Причем R^+ состоит из тех точек секущей поверхности, через которые проходит траектория, возвращающаяся на поверхность при движении вперед, а R^- при движении назад.

В момент τ (рис.4б), когда решение проходит через нуль, состояние системы определяется как $v = \dot{\theta}(t)$. Поскольку зависимость от времени периодична, τ можно считать циклической координатой, а в силу симметрии относительно изменения знака θ можно ограничиться рассмотрением лишь значения $v > 0$. При $v = 0$ значение τ не играет роли, поскольку в силу теоремы единственности $\theta'(\tau) = 0$ может быть лишь у тривиального решения $\theta(t) \equiv 0$. Это позволяет считать (v, τ) полярными координатами на некоторой плоскости Φ .

Второй случай (рис.5) определяет процесс самоорганизации аварийного МО. Здесь приведен потенциал $V(\theta)$, связанный с внешним возмущением

M_0 соотношением $M_0 = -dV/d\theta$ или $V = \frac{1}{2} a\theta^2$. В случае линейной системы существует одно стационарное состояние $d\theta/dt=0$, $\theta=0$ и оно устойчиво.

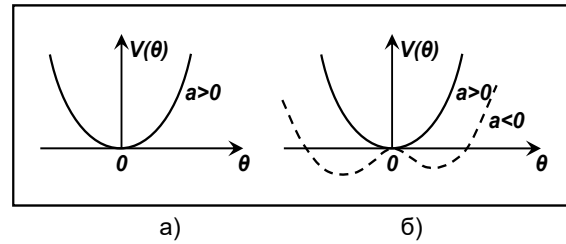


Рис.5. «Потенциальная яма» в задаче эволюционной динамики аварийного МО

Предположим, что восстанавливающий момент описывается нелинейной функцией. Уравнение движения в этом случае принимает вид

$$\theta = -a\theta^2 - \beta\theta^3, \quad (3)$$

где $\beta > 0$. При этом «потенциальная яма» описывается выражением

$$V(\theta) = 1/2a\theta^2 + 1/2\beta\theta^4. \quad (4)$$

Исследование предполагает два случая: а) $a > 0$, $\beta > 0$ – в этом случае форма нового потенциала остается прежней, и единственное стационарное решение, которое устойчиво, есть точка $\theta = 0$; б) $a \leq 0$, $\beta > 0$ – при переходе через критическое значение $a_c = 0$ форма потенциала изменяется, хотя остается симметричной (рис.5б). Потенциал

$$V(\theta) = a\theta^2 + 3/4\beta/4, \quad (5)$$

при $a > 0$ (сплошная линия) и при $a < 0$ (пунктир). Теперь число стационарных решений равно трем: все три корня уравнения

$$a\theta^2 + \beta\theta^3 = 0 \quad (6)$$

при $a < 0$, $\beta > 0$ действительны. Но прежнее симметричное устойчивое стационарное состояние $\theta = 0$ становится неустойчивым и система переваливается в одно из равновесных состояний

$$\theta = (|a|/\beta)^{1/2}, \theta = -(|a|/\beta)^{1/2}, \quad (7)$$

Результаты анализа показывают, что для возникновения неопределенности относительно следующего состояния совсем не обязательно иметь большее число степеней свободы: одной лишь неустойчивости достаточно, чтобы породить – через бифуркацию – непредсказуемое поведение, которое принято связывать со стохастичностью.

Алгоритм функционирования программного комплекса построения сценариев и оценки риска принимаемых решений при поддержке исполнения конкретной задачи интерпретации «потенциальной ямы» в условиях самоорганизации определяется в виде последовательности шагов, базовый цикл которых может выполняться как в пакетном, так и в потоковом режимах.

3. Стратегии самоорганизации при формировании «потенциальной ямы» в среде ГМ

Реализации разработанной стратегии и концептуальных решений СТК рассмотрены применительно к эволюции МО для следующих

случаев взаимодействия: перестройки динамической картины поведения при непрерывном изменении параметров аварийного МО и внешней среды (рис.6 и 7) при симметричном и асимметричном затоплениях [4];

Характерные точки катастрофы на этих рисунках – центр масс G , кривая центров величины $C(\theta)$, метацентр m_0 , точка сборки P и область бифуркационного множества $B(\theta)$ изменяют свое положение в процессе структурной и параметрической самоорганизации. Затененная область $GZ_0(\theta)$ соответствует изменению восстанавливающего момента $M(\theta)$, при положительной величине метацентрической высоты.

Случай взаимодействия (рис.6) отображает результат преобразования динамической картины катастрофы на основе структурной и параметрической самоорганизации. Исходная модель взаимодействия соответствует формированию первого классического случая затопления S_1 (симметричное затопление) и перехода системы в новый режим S_3 вследствие интенсивного затопления отсеков на нерегулярном волнении. При этом происходит резкое снижение метацентрической высоты и переход системы в область ее отрицательных значений (формирования аттрактора бистабильной динамической системы).

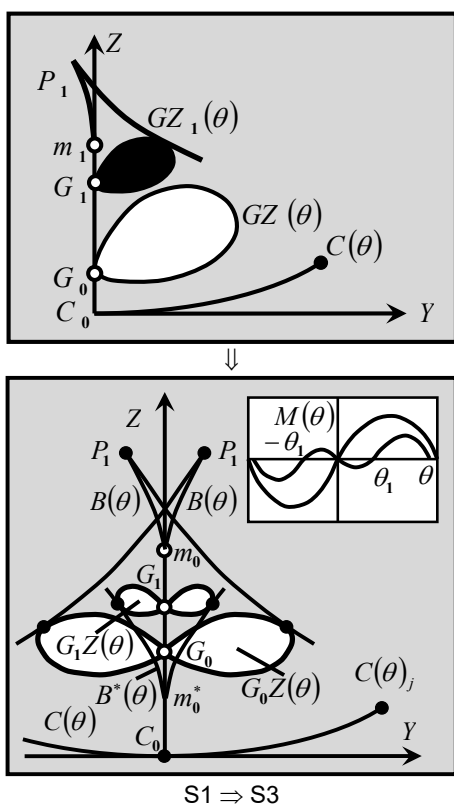


Рис.6. Перестройка модели катастроф при симметричном затоплении отсеков поврежденного судна

Формирование «потенциальной ямы» в режиме S_3 рассматриваемой ситуации происходит вследствие резкого уменьшения метацентрической высоты в процессе эволюции аварийного МО. Особенность пульсирующей «потенциальной ямы» в

этих условиях состоит в переходе МО из состояния θ_1 на правый борт в состояние $-\theta_1$ на левый борт.

Динамические картины взаимодействия на рис.7 отображают результат структурной и параметрической самоорганизации при асимметричном затоплении отсеков поврежденного МО. Исходная модель катастрофы характеризует формирование второго классического случая затопления S_2 и переход системы в новый аттрактор, соответствующий более сложному режиму S_4 при отрицательных значениях метацентрической высоты за счет влияния влившейся воды.

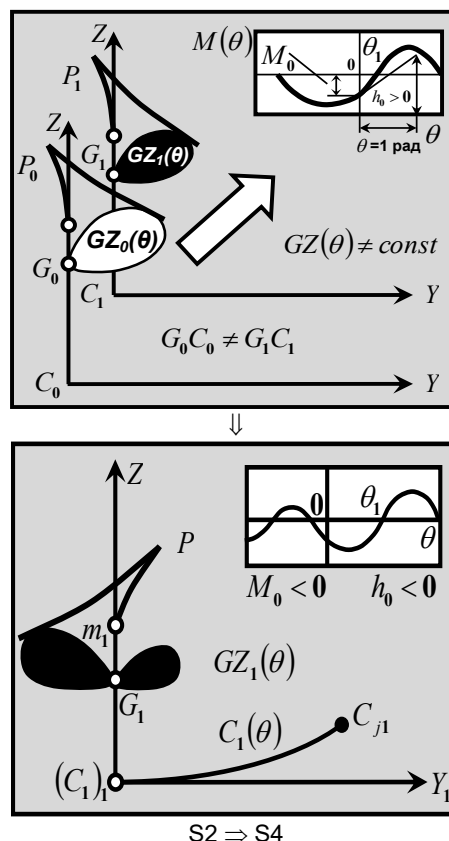


Рис. 7. Самоорганизация динамических моделей катастроф при асимметричном затоплении отсеков аварийного МО

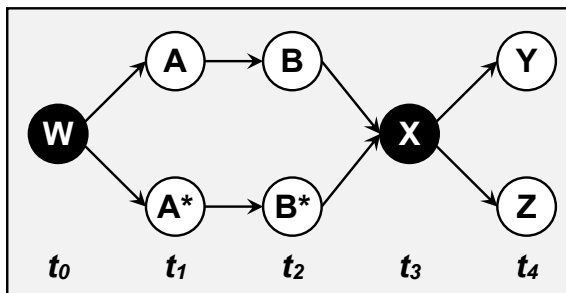
4. Интерпретация «потенциальной ямы» на основе когнитивной парадигмы в среде ГМ

Приведенные выше случаи перестройки динамических картин взаимодействия в условиях «потенциальной ямы» рассмотрены на основе когнитивного моделирования [4], [5], позволяющего представить эволюционную динамику МО в виде когнитивной карты (рис.8).

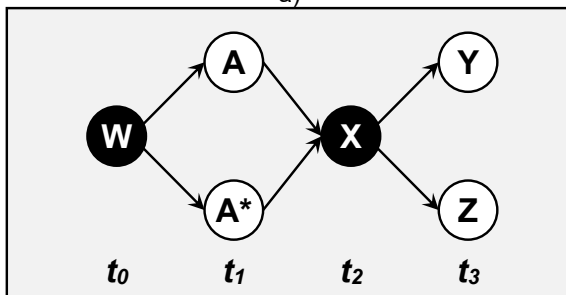
Здесь на рис.8а приведена когнитивная карта, имитирующая случаи взаимодействия в условиях периодического снижения метацентрической высоты. Интерпретация динамической картины на этом рисунке имеет следующий вид: в процессе развития ситуации на основе внешнего возмущения W формируются конкурирующие альтернативы A и A^* и управляющие воздействия B и B^* . В момент времени t_3 (символ X) вследствие структурной самоорганизации происходит смена состояний, и МО оказывается в ситуации S_3 (символ Y – возникновение пульсирующей «потенциальной

ямы») или S_4 (символ Z – стабилизация ситуации при формировании целевого аттрактора) в зависимости от модели эволюции МО.

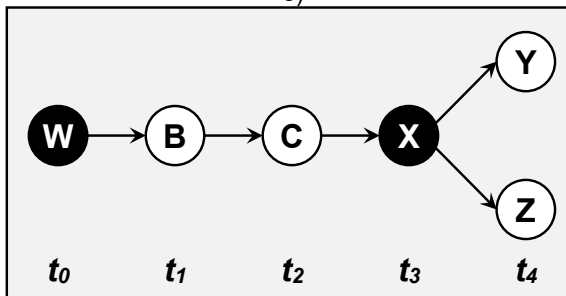
Случай «захвата» носовой оконечности при движении МО на встречном волнении изображает когнитивная карта на рис.8б. Динамическая картина взаимодействия в этом случае имеет следующий вид: на основе внешнего возмущения W формируются конкурирующие альтернативы A и A^* , определяющие управляющие воздействия. В момент времени t_2 (символ X) возникает удар волны в носовую оконечность и МО оказывается в ситуации S_3 (символ Y – потеря остойчивости и прочности в условиях «потенциальной ямы») или S_4 (символ Z – стабилизация ситуации при снижении уровня волновых воздействий для принятой модели эволюции МО).



а)



б)



в)

Рис.8. Динамические картины возникновения «потенциальной ямы» на основе когнитивной карты:

а – интерпретации в условиях снижения метацентрической высоты; б – эволюционная динамика «потенциальной ямы» в условиях «захвата» носовой оконечности; в – интерпретация выхода из режима «захвата» в ситуации «броучинг»

Изменения характера взаимодействия для ситуации «броучинг» имеет вид, представленный на рис.8в. Когнитивная карта интерпретации этой ситуации отображает последовательность символов $W \rightarrow Y$ или $W \rightarrow Z$ в зависимости от особенностей эволюции МО в условиях «потенциальной ямы». Возникновение ситуации «броучинг» (символ B –

broaching) определяется явлением «захвата» МО набегающей волной (символ C – capture). При выходе из состояния «захвата» (символ X в момент времени t_3) МО оказывается в «потенциальной яме», глубина которой характеризуется символами Y и Z . Ситуация Y связана с «потенциальной ямой» недостаточной глубины и МО продолжает эволюцию в виде неуправляемого разворота на волнении. В случае глубокой «потенциальной ямы» (символ Z) МО теряет остойчивость и опрокидывается при воздействии интенсивных возмущений W .

Процессы самоорганизации в исследуемых ситуациях связаны с особенностями структурной динамики. Если в первом случае (рис.8а) вследствие непрерывного изменения метацентрической высоты происходят процессы, обусловленные сравнительно «медленной» динамикой, то во втором случае (рис.8б) под воздействием удара возникает «быстрая» динамика, в процессе развития которой практически невозможно разрабатывать управляющие воздействия. В этом отношении интерпретация ситуации удара напоминает возникновение «потенциальной ямы» в режиме «броучинг», которая формируется практически мгновенно и выработка управляющих воздействий может привести только к ухудшению ситуации.

5. Формальный концептуальный анализ (ФКА) при контроле «потенциальной ямы» в среде ГМ

Процедуры ФКА (рис.9) [10] при контроле возникновения «потенциальной ямы» позволяют выделить объекты, число которых примем как $G_1 - G_4$. Представим эти объекты в виде множества $G = \{a, b, c, d\}$, где a – отображающий граф; b – матрица переходов; c и d – существование и отсутствие ориентированного ребра. Свойства объектов множества G образуют множество $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, где цифры соответствуют выделенным элементам; 1 – структурный и параметрический анализ; 2 – пространственно-временная эволюция; 3 – фазовые переходы; 4 – механизмы взаимодействия; 5 – задачи интерпретации.

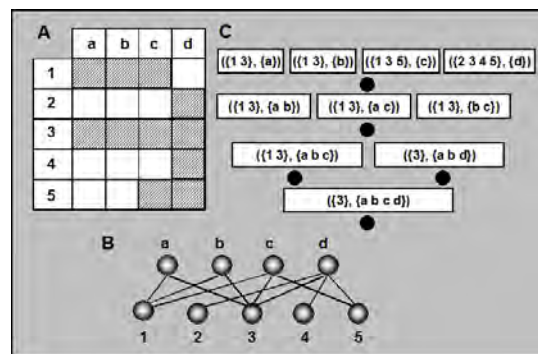


Рис.9. Формальный контекст (А), двудольный граф (В) и диаграмма Хассе (С) при интерпретации динамики МО (символом • отмечена операция Data Mining)

Результаты ФКА в виде отношения I на множествах G и M представлены на рис. 9 формальным контекстом $K = (G, M, I)$ бинарной матрицей (рис.9А), а бинарное отношение I – в виде двудольного графа (рис.9В). Классификацию объектов для заданных свойств характеризует

концептуальная решетка (G,M,I) в виде диаграммы Хассе (рис.9С).

Общий случай моделирования пульсирующей «потенциальной ямы» представлен на рис.10 в виде фрагментов фрактального отображения динамики взаимодействия на интервале $[t_0, t_k]$ [3], [4], [5].

Геометрическая сцена взаимодействия в заданном режиме перестраивается в направлении формирования аттрактора при возникновении катастрофы. Как следует из приведенных данных, в соответствии с особенностями преобразования информации на основе СТК, фрактальная структура реализует принцип непрерывности при интерпретации эволюции МО при возникновении «потенциальной ямы».

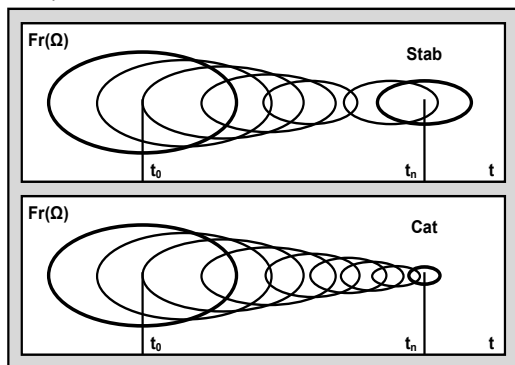


Рис.10. Фрактальные множества $Fr(\Omega)$, определяющие поведение МО на волнении: верхнее поле – формирование целевого аттрактора; нижнее поле – потеря устойчивости и прочности вследствие воздействия неблагоприятных факторов (возникновение катастрофы)

Заключение

Рассмотренные методы анализа и прогноза возникновения «потенциальной ямы» на базе стратегической платформы Computational Science в среде ГМ определяются следующими условиями:

- формированием моделей интерпретации «потенциальной ямы» в процессе развития эволюционной динамики МО в функциональных пространствах СТК [3];
- функциями интерпретации операций контроля эволюции «потенциальной ямы» в моделях динамики МО при различном уровне внешних возмущений на основе исследований [3] – [5];
- формализацией операций анализа и прогноза моделирования и интерпретации поведения МО в эволюционирующей среде.

Сформулированные принципы и методы исследования приложений Computational Science обеспечиваются системой ИП на основе НФС [4].

Таким образом, общенаучная основа решения прикладных задач динамики МО определяют «концептуальный мост» между фактами и механизмами взаимодействия при комплексном изучении чрезвычайных ситуаций, переходом от содержательной постановки задач к их математической и научно-технической реализации [4], [5].

Литература

1. Красовский А.А., Наумов А.И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. №1, с.69 – 75.
2. Кронновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Техносфера, 2000. 350 с.
3. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
4. Нечаев Ю. И., Петров О. Н. Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. 368 с.
5. Нечаев Ю.И. Компьютерная математика: прикладные аспекты. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2019. 368 с.
6. Николис Дж. Динамика иерархических систем. М.: Мир, 1989. 486 с.
7. Figueira G., Almada-Lobo B. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion // Simulation Modelling Practice and Theory. 2014. V. 46. P.p. 118 – 134.
8. Szalay A. Extreme data-intensive scientific computing // Computing in Science & Engineering. 2011. V. 13. #6, P.p. 34 – 41.
9. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
10. Wille R. Restructuring Lattice Theory: An Approach Based on Hierarchies of Concepts. In: Rival I. (eds) Ordered Sets. NATO Advanced Study Institutes Series (Series C — Mathematical and Physical Sciences), vol 83. Springer, Dordrecht, 1982.

References

1. Krasovskiy A.A., Naumov A.I. Analiticheskaya teoriya samoorganizuyushchikhsya sistem upravleniya s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta. Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. [Analytical theory of self-organizing control systems with a high level of artificial intelligence. Izvestiya RAN. Control theory and systems] 2001. #1, p. 69–75.
2. Kronnover R.M. Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh [Fractals and chaos in dynamical systems]. Moscow, Technosphere Publ., 2000.
3. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2011.

4. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
5. Nechaev Yu. I. Komp'yuternaya matematika: prikladnye aspekty [Computer mathematics: applied aspects]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ, 2019.
6. Nikolis Dzh. Dinamika ierarkhicheskikh sistem [Dynamics of hierarchical systems]. Moscow: World Publ., 1989.
7. Figueira, Gonçalo & Almada-Lobo, Bernardo. (2014). Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. Simulation Modelling Practice and Theory. 46. 10.1016/j.simpat.2014.03.007.
8. Szalay, Alexander. (2012). Extreme Data-Intensive Scientific Computing. Computing in Science & Engineering. 13. 34 - 41. 10.1109/MCSE.2011.74.
9. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
10. Wille R. (1982) Restructuring Lattice Theory: An Approach Based on Hierarchies of Concepts. In: Rival I. (eds) Ordered Sets. NATO Advanced Study Institutes Series (Series C — Mathematical and Physical Sciences), vol 83. Springer, Dordrecht.

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

Олег Николаевич Петров, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: petr_oleg@mail.ru

Oleg N. Petrov, Ph.D. (Eng), associate professor, associate professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: petr_oleg@mail.ru

Поступила в редакцию:
Принята к публикации:



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**