

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

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
1001000111100110111100101001101110011001010001101010011001100101010110001010010010101110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
0010100111001010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



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



ULRICH'S KNOWLEDGEBASE



№ 3 Том 1 2021
№ 3 Part 1 2021

Morskie intelektual 'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 том 1 2021 Сквозной номер 53

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление



О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

Отрасль науки, группа специальностей	по которым присуждается ученая степень
Кораблестроение	
Теория корабля и строительная механика	Технические
Проектирование и конструкция судов	Технические
Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства	Технические, экономические
Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)	Технические
Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие	Технические, Физико-математические
Информатика, вычислительная техника и управление	
Системный анализ, управление и обработка информации	Технические, Физико-математические
Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)	Технические
Управление в социальных и экономических системах	Технические
Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей	Технические, Физико-математические
Системы автоматизации проектирования	Технические, Физико-математические
Теоретические основы информатики	Технические, Физико-математические
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. Лощманская 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 № 3 part 1 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, 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, 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
- **Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Александр Исаакович Фрумен**, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Валерий Иванович Трусов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Алексеевич Рогозин**, к.т.н., Адмиралтейские верфи
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Андрей Анатольевич Девяткин**, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный Университет Водного Транспорта
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, доцент, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Сергей Васильевич Москвин**, к.т.н., доцент, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Иванович Костылев**, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Олегович Токарев**, доктор технических наук, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Андрей Борисович Фомичев**, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science,
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Michael V. Voyloshnikov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Alexander I. Frumen**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad state technical university
- **Valerii I. Trusov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir A. Rogozin**, Ph.D. (Eng), Admiralty Shipyards
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Andrei A. Deviatkin**, Ph.D. (Eng), Siberian State University of Water Transport
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergei V. Moskvina**, Ph.D. (Eng), Baltic State Technical University "VOENMEKH" D.F. Ustinova
- **Galina G. German**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Ivan I. Kostylev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr O. Tokarev**, Dr. Sci. (Eng.), Siberian state university of water transport
- **Aleksey Yu. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng.), St. Petersburg state marine technical University
- **Stepan Y. Malamanov, Dr. Sci. (Phys & Math.)**, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Andrei B. Fomichev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University



51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

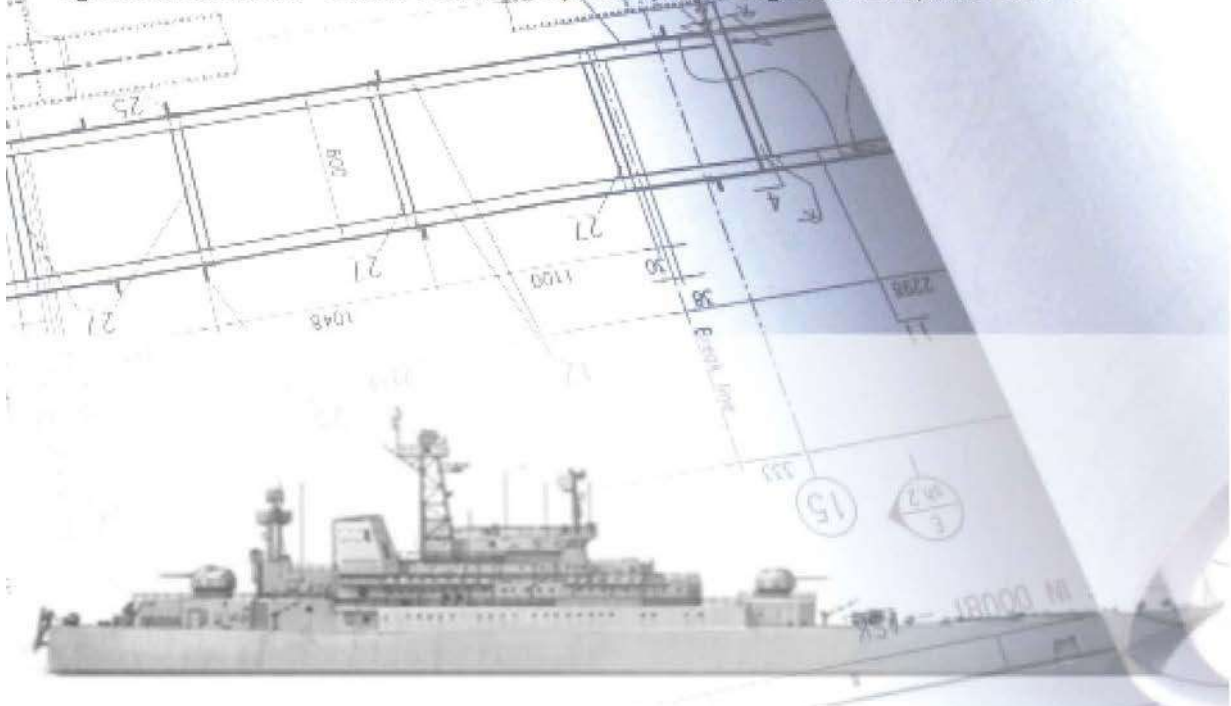
Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email:office@51cktis.ru

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

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

Институт назначен головной организацией по разработке ремонтной документации на надводные корабли и суда ВМФ.

Институт выполняет техническое освидетельствование и обследование кораблей, судов и прочих плавучих сооружений с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации; осуществляет разработку государственных военных стандартов ГОСТ РВ; обеспечивает исполнителей ГОЗ всеми видами документации на корабли (суда), их составные части и комплектующие изделия из фонда технической документации, содержащего 2 900 000 документов по 784 проектам; осуществляет обучение по дополнительной образовательной программе «Ремонтные и типовые организационно - технические документы для кораблей и судов ВМФ».



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Сысоев О.Е., Сысоев Е.О., Добрышкин А.Ю. Уточнение расчетной модели колебаний для цилиндрических опор конструкций нефтегазовых платформ при передислокации.....	12
Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил Регистра Судоходства в части ограничения заливаемости.....	18
Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно в условиях мелководья на основании использования трехмерной потенциальной теории.....	25
Чепурко С.И., Яковлев А.Ю. Численное исследование работы гребных лопаток.....	34
Осипов В. И. Аналитическое сравнение продольного спуска судна на воду с посадкой на мель.....	41
Козин В.М. Результаты моделирования зависимости высоты изгибно-гравитационных волн в плавающей пластине с заданной кромкой от наклона дна водоема.....	47

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Тряскин В.Н., Юй Синьянь Постановка и решение задачи проектирования рамного набора поперечной водонепроницаемой переборки крупнотоннажного контейнеровоза с использованием оптимизационно - поисковых процедур и нормативных требований Правил DNV-GL.....	53
---	----

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мурзин В.В. Сое К.М. Разработка физических моделей для расчёта тепловых полей при мокрой подводной сварке.....	60
Герасимов Н.И., Кравчишин В.Н., Горелов В.В. К вопросу о возможности технологического перемещения крупных сборочно-монтажных единиц по ледяным транспортировочным путям.....	64
Фирсова А.В., Хмара Д.С., Шальнов М.А. Основные направления развития автоматизированных систем управления и поддержки принятия решений в судостроении и организации рабочих мест.....	70

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Епихин А.И., Модина М.А. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов.....	77
Зайцев В.П., Рослякова О.В., Бочкарева И.И. Модифицированное топливо для снижения вредных выбросов двигателя внутреннего сгорания.....	83
Епихин А.И., Игнатенко А.В. Некоторые аспекты реализации технологий управления энергетическими установками с учетом концепции автономных судов.....	88
Гульй В.А., Сербин И.С. К вопросу о применении на линейных атомных ледоколах ГТЗА с прямой передачей.....	96

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Лукьянов В.Д., Носова Л.В., Лебедев Г.А., Попков С.В. Колебания упругой пластины, расположенной в торце полубесконечного цилиндрического акустического волновода.....	104
Маламанов С.Ю., Павловский В.А. О действии индуцированного в морской воде электромагнитного поля, на находящееся в ней заряженное тело.....	112
Боран-Кешишьян А.Л., Лисютин В.А., Маленко Ж.В., Ярошенко А.А. Изучение связи между дисперсионными искажениями импульсных сигналов и акустическими свойствами дна мелкого моря.....	118

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шулина А.В. Моделирование схемы безопасного движения морской акватории.....	127
Кузьмичев И.К., Малышкин А.Г., Уртминцев Ю.Н., Домнина О.Л. Совершенствование научно-методической базы системы организации перевозок грузов на внутреннем водном транспорте.....	135

Малыгин И.Г., Ложкина О.В., Онов В.А., Остудин Н.В., Панкратова М.В. Автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования земли при анализе рисков аварийных разливов нефтепродуктов на водной поверхности.....	142
Ляховский Е.Е., Герман Г.В. Достоверное временное прогнозирование уонструктивно-технологических, эксплуатационных м технико-экономических показателей изделий морской техники.....	150
Иванов Ю.П. Финитно-временной и спектрально-финитный методы оптимальной фильтрации дискретных сигналов.....	154
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Показатели экологической безопасности водного транспорта.....	161
Фахми Ш.С., Колесниченко С.В., Костикова Е.В., Селиверстов С.А., Бородина О.В., Халтурин А.А., Терлеев А.В. Оценка скорости и сложности алгоритмов спектрального преобразования изображений в системах наблюдения за морскими судами.....	171
Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Колесниченко С.В. Многопроцессорная система обнаружения и слежения за морскими судами на базе технологии «система на кристалле».....	179
Демидкин В.В. Неиспользуемые потенциальные возможности в ГМССБ: цифровой избирательный вызов.....	186
Батанина Е.А., Домнина О.Л. Оценка возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов.....	192

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Скороходов Д.А., Крылов Ю.Е., Стариченков А.Л. Управление судном в штормовых условиях....	200
Высоцкий В.Е., Конева С.А., Марков И.Ю., Цалоев В.М. Синтез скалярной САУ частоты вращения вентильного двигателя для ГЭУ ледокола с движительно-рулевым комплексом «Азипод».....	207
Чернышов А.В. Графические критерии собственной устойчивости судна на мелководье.....	215

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Олейников Б.И., Костылев И.И., Коняев Д.В., Петров А.П. Особенности управления судами без экипажей.....	220
Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю. Интеллектуализация транспортной системы Северного морского пути.....	228
Таранцев А.А., Борисов А.Н., Галиев М.С. О пожароопасности транспортных гидротоннелей.....	236
Чугунов В. И. Оценка уровня готовности морских специалистов к действиям в экстремальных условиях.....	241
Кострикова Н.А., Яфасов А.Я. Формирование новой экосистемы рыбохозяйственного комплекса России в современных условиях.....	247
Огий О.Г., Осипов В.Ю., Тристанов А.Б., Жукова Н.А. Процесс управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса как объект моделирования.....	255

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. Особенности гидравлического расчета судовых вакуумных рыбонасосных установок.....	262
Керестень И.А., Попов И.А., Ховайко М.В. Математическое моделирование подводной укладки кабеля с учетом действия неоднородной гидростатической силы в условиях Арктического бассейна	267

CONTENTS	page
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Oleg E. Sysoev, Evgeny O. Sysoev, Artem Y. Dobryshkin Refinement of the calculation model of vibrations for cylindrical supports of structures of oil and gas platforms during relocation.....	12
Rudol'f V. Borisov, Aleksandr A. Luzianin On the development of the project of requirements of the rules of RS into account of limitations for flooding.....	18
Viktoriya Yu. Semenova, Danil A. Al'baev The determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship in shallow water conditions based on the use of three-dimensional potential theory.....	25
Sergey I. Chepurko, Aleksey Yu. Yakovlev Numerical modeling of paddling blades activity.....	34
Vladislav I. Osipov Analytical comparison of longitudinal launching of a vessel into the water with grounding.....	41
Viktor M. Kozin Results of modeling the dependence of the height of flexural-gravity waves in a floating plate with a sealed edge on the inclination of the bottom of the reservoir.....	47
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Vladimir N. Tryaskin, Yu Xinyan Statement and solution the problem of designing of water-tight bulkheads web frames for large container vessels by using DNV-GL Rules requirements and optimization techniques.....	53
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Viktor V. Murzin, Kyaw Min Soe Development of physical models for calculating thermal fields in wet underwater welding.....	60
Nikolay I. Gerasimov, Vladimir N. Kravchishin, Vladimir V. Gorelov By the problem of the possibility of technological movement of large assembly units along ice transportation routes.....	64
Anna V. Firsova, Dmitriy S. Khmara, Maksim A. Shalnov The main directions of development of automated control systems and decision support in shipbuilding and workplace organization.....	70
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Alexey I. Epikhin, Marina A. Modina Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses.....	77
Valerii P. Zaitsev, Oksana V. Roslyakova, Irina I. Bochkareva Modified fuel to reduce the harmful emission of an internal combustion engine.....	83
Aleksey I. Epikhin, Aleksandr V. Ignatenko Some aspects of the implementation of power plant management technologies taking into account the concept of autonomous vessels.....	88
Vladimir A. Gulyy, Ivan. S. Serbin On the question of the use of GTZA with direct transmission on linear nuclear icebreakers.....	96
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Valeriy D. Lukyanov, Lyudmila V. Nosova, German A. Lebedev, Sergey V. Popkov Oscillations of elastic plate, located at the end of semi-infinite cylindrical acoustic waveguide.....	104
Stepan Y. Malamanov, Valery A. Pavlovsky On the action of an electromagnetic field induced in seawater on a charged body in it.....	112
Anastas L. Boran-Keshishyan, Victor A. Lisyutin, Zhanna V. Malenko, Alexander A. Yaroshenko Study of the relationship between dispersion distortions of impulsive signals and acoustic properties of the shallow sea bottom.....	118
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Victor M. Grinyak, Alexander S. Devyatisilnyi, Alena V. Shulenina Modelling of safe traffic schema for marine area.....	127
Igor K. Kuzmichev, Alexander G. Malyshkin, Yuri N. Urtmintsev, Olga L. Domnina Improvement of the scientific and methodological base of the system of organization of cargo transportation on inland water transport.....	135

Igor G. Malygin, Olga V. Lozhkina, Vitaly A. Onov, Nikita V. Ostudin, Maria V. Pankratova Automated processing of remote sensing data in the analysis of the risks of accidental oil spills on water surface.....	142
Evgeny E. Lyakhovsky, Galina V. Herman Reliable time forecasting of structural and technological, operational and technical and economic indicators of marine equipment products.....	150
Yuriy P. Ivanov Finite-time and spectral-finite methods of optimal filtering of discrete signals.....	154
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Sergey N. Turusov Evaluating the effectiveness of a shipping company environmental protection.....	161
Shakeeb S. Fahmi, Sergey V. Kolesnichenko, Elena V. Kostikova, Svyatoslav A. Seliverstov, Olga V. Borodina, Artyom A. Khalturin, Andrei V. Terleev Estimation of the bitrate and complexity of spectral image transformation algorithms in marine vessel surveillance systems.....	171
Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Sergey V. Kolesnichenko Multiprocessor system for detecting and tracking marine vessels based on the "system on chip" technology.....	179
Vladimir V. Demidkin Unused resources in global maritime distress safety system: digital selective call.....	186
Ekaterina A. Batanina, Olga L. Domnina Assessment of the possible amount of harm in case of emergency discharges of bulk cargo from ships.....	192
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Dmitriy A. Skorokhodov, Yuriy E. Krylov, Aleksey L. Starichenkov Ship control in storm conditions...	200
Vitaly E. Vysotsky, Svetlana A. Koneva, Igor U. Markov, Vladimir M. Tsaloev Synthesis of a scalar ACS of the valve motor rotational speed for the icebreaker's ERM with a propulsion-steering complex "Azipod".....	207
Andrey V. Chernyshov Graphical criteria of inherent stability of river vessels for the case of shallow waters navigation.....	215
CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS	
Boris I. Oleynikov, Ivan I. Kostylev, Dmitriy V. Koniaev, Aleksandr P. Petrov The peculiarities of the unmanned ships operating.....	220
Igor V. Gurlev, Alexander A. Makosko, Igor G. Malygin, Valery Yu. Kaminsky. Intellectualization of the transport system of the Northern sea route.....	228
Alexandr A. Tarantsev, Alexander N. Borisov, Maxim S. Galiev. About the fire hazard of transport hydrotunnels.....	236
Valery I. Chugunov Assessing the level of readiness of marine specialists to act in extreme conditions...	241
Natalia A. Kostrikova, Abdurashid Y. Yafasov The formation of a new ecosystem of the fishery industry of Russia in modern conditions.....	247
Oksana G. Ogij, Vasiliy Y. Osipov, Alexander B. Tristanov, Natalia A. Zhukova The process of labor potential managing of the fishery complex as a modeling object.....	255
MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS	
Natalia R. Akhmedova, Vladimir A. Naumov Features of hydraulic calculation of marine vacuum fish pumping units.....	262
Ilya A. Keresten, Ivan A. Popov, Mikhail V. Khovaiko Numerical simulation of underwater cable laying with account of non-uniform hydrostatic force at Arctic basin condition.....	267

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 534.13

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.001>

Уточнение расчетной модели колебаний для цилиндрических опор конструкций нефтегазовых платформ при передислокации

О.Е. Сысоев¹, e-mail: fks@knastu.ru, Е.О. Сысоев¹ e-mail: fks@knastu.ru,А.Ю. Добрышкин¹ e-mail: www.artem21@mail.ru¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация. В статье рассмотрена проблема предотвращения разрушения опор нефтегазовых морских платформ при передислокации. Цилиндрические конструкции опор нефтегазовых платформ очень чувствительны к динамическим воздействиям внешних сил, которые вызывают колебания конструкций и явление резонанса, особенно при передислокации. Цилиндрические опоры платформ также несут дополнительные массы (оборудование, антиледовый пояс и т.п.), которые оказывают значительное влияние на динамику работы оболочек. В статье уточнена математическая модель колебаний оболочек, несущих дополнительную массу, на основе теории Рейснера. Проведены экспериментальные исследования на уменьшенных моделях оболочек, проверки уточнённой математической модели, показано сравнение экспериментальных и теоретических исследований. Основное отличие скорректированной математической модели заключается в присутствии нового параметра, учитывающего влияния наличия малой дополнительной массы. Уточненная математическая модель позволит более точно рассчитывать частоты колебаний конструкции в режиме online, и предотвращать возможные разрушения цилиндрических опор конструкций нефтегазовых платформ при передислокации.

Ключевые слова: оболочка, колебания, математическая модель, экспериментальные исследования, малая дополнительная масса

Refinement of the calculation model of vibrations for cylindrical supports of structures of oil and gas platforms during relocation

Evgeny O. Sysoev¹ e-mail: fks@knastu.ru, Oleg E. Sysoev¹ e-mail: fks@knastu.ru,Artem Y. Dobryshkin¹ e-mail: www.artem21@mail.ru¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation

Abstract. The article deals with the problem of preventing the destruction of the supports of oil and gas offshore platforms during relocation. Cylindrical structures of oil and gas platform supports are very sensitive to dynamic influences of external forces, which cause vibrations of structures and the phenomenon of resonance, especially during relocation. Cylindrical platform supports also carry attached masses (equipment, anti-ice belt, etc.), which have a significant impact on the dynamics of the shells operation. The article refines the mathematical model of vibrations of shells carrying the added mass on the basis of Reisner's theory. Experimental studies are carried out on reduced models of shells, verification of the refined mathematical model, a comparison of experimental and theoretical studies is shown. The main difference of the corrected mathematical model is the presence of a new parameter that takes into account the influence of the presence of a small added mass. The refined mathematical model will make it possible to more accurately calculate the vibration frequencies of the structure online, and prevent possible destruction of the cylindrical supports of the structures of oil and gas platforms during relocation.

Key words: shell, vibrations, mathematical model, experimental studies, small added mass

Введение

Впервые добыча нефти на шельфе была произведена на Апшеронском полуострове в России в 1824 году. 1896 году мистер Уильямс, нефтяник из Калифорнии, в Мексиканском заливе в 400 м от берега пробурил нефтяную скважину. Первая серьезная катастрофа произошла 27 декабря 1965 года при перемещении буровой платформы Sea Gem на новое место бурения. В результате аварии погибло 13 человек. Расследование установило причины аварии - усталость металла опор платформы. Платформа Alexander L. Kielland затонула 27 марта 1980 г. в Северном море. Буровая платформа была погружного типа, погибло 123 человека. Причиной катастрофы признана усталость металла. Хотя платформа эксплуатировалась всего 4 года, произошел разрыв ребра жесткости соединяющих опоры платформы. При буксировке буровой платформы Кольская с Камчатки на Сахалин 18

декабря 2011 г., она опрокинулась и затонула, погибло 53 человека [1].

В настоящее время в Мексиканском заливе действуют почти 4000 нефти добывающих платформ [1], а еще в Атлантике у берегов Европы, Южной Америки, и Африки, а также в Южно-китайском море [1]. В России на 2020 действует менее 30 платформ – это менее 1% [2], при 10% мировой добычи нефти, следовательно количество нефтегазодобывающих платформ на шельфе нашей страны будет возрастать и проблемы их гарантированного безопасного перемещения должны решаться.

Современные конструкции нефтегазодобывающих платформ, все чаще в качестве опор применяют металлические или железобетонные цилиндрические оболочки, из-за очевидной экономической целесообразности – эффективного соотношения внутреннего объема к внешней поверхности, когда внутренний объем оболочки используется для временного хранения добытого продукта. Законодателями моды в этой области

можно считать российскую платформу «Лун-А» (высотой 69,5 метра и весом 103 000 тонн, 2006 г.) и норвежскую платформу Тролль (Troll Oil platform) (высотой 472 м и весом 656 000 тонн (вместе с основанием) — работает с 1996 года в Северном море).



Рис. 1. Затопление железобетонного основания платформы «Лун-А» в июле 2006 в 15 км от Сахалина на глубину 48 м [3].



Рис. 2. Транспортировка нефтяной платформы Тролль (Troll Oil platform) платформы в Северное море в 1996 году [3].

При всех, выше приведенных, достоинствах цилиндрические оболочки чувствительны к эффекту резонанса при совпадении частот собственных колебаний конструкций и частот вынужденных колебаний от воздействия внешних сил динамического характера [5-7]. Также нужно учитывать, что при изменении напряженно-деформированного состояния материала конструкции от действия статических нагрузок, изменяется частотный спектр собственных колебаний конструкций [8, 9]. Более того на частоту колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки может оказывать влияние дополнительная масса [10, 11]., как например антиледовый пояс на платформе Беркут (Рис.3). Поэтому нужно создавать системы противофазного возбуждения колебаний конструкций, предотвращающих резонанс, для этого нужны точные расчетные модели работающие в режиме online.



Рис. 3. Транспортировка нефтяной платформы Беркут, июнь 2012 г. (высота 41 метр и вес 130 000 тонн) [4]

1. Экспериментальные исследования

Для решения проблемы расчета частоты и амплитуды колебаний цилиндрических оболочек, и проверки существующих расчетных моделей в Комсомольском-на Амуре государственном университете, были получены экспериментальные данные на уменьшенных моделях оболочек [12, 13]. На рис.4 представлена схема эксперимента на модели тонкостенной цилиндрической оболочки с дополнительной массой при жестком закреплении её с одного торца.

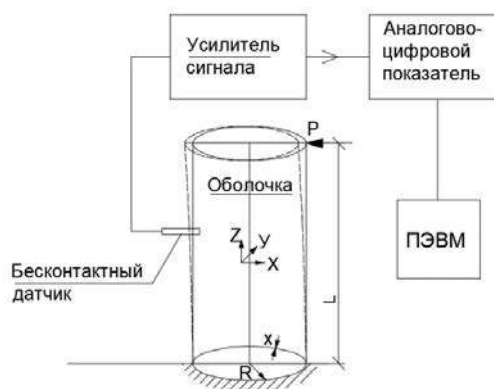


Рис. 4. Схема проведения эксперимента при жестком закреплении с одного торца.

Вынужденные колебания тонкостенной цилиндрической оболочки создаются молотком AU03. Электрический аналоговый сигнал с контактного датчика BC110, играющего одновременно роль дополнительной массы, проходит через аналоговый усилитель, затем через аналого-цифровой преобразователь и обрабатывается персональным компьютером с использованием программного комплекса «ZETLAB». Блок-схема для проведения экспериментального исследования приведена на

рисунке 4. Экспериментальная установка при жестком закреплении образца с одного торца D=200мм, L=450мм, б = 0,5 мм из стали X17 показана на рисунке 6.



Рис. 5. Экспериментальная установка при жестком закреплении образца с одного торца D=200мм, L=450мм, б=0,5 мм из стали X17.

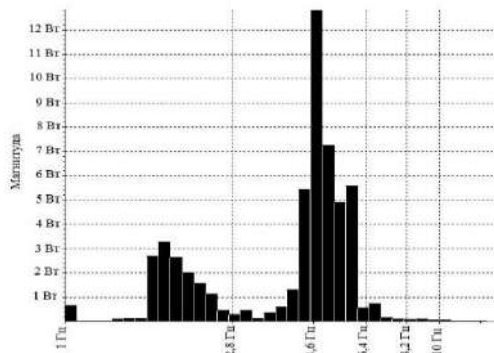


Рис. 6 Частотный спектр колебаний цилиндрической оболочки из стали X17 D=200 мм. при жёстком закреплении, при температуре 22°С.

2. Расчетная модель

Традиционная математическая модель для проведения численных расчетов частоты колебаний оболочек Рейснера [14, 15]:

$$D\Delta\Delta\Phi + \rho h\ddot{\Phi} - \frac{\rho h^3}{12} \left(1 + \frac{2}{\Gamma(1-\mu)}\right) \Delta\ddot{\Phi} + \frac{\rho^2 h^3}{12G\Gamma} (\ddot{\Phi}) = 0,$$

$$\Delta F - \frac{12\Gamma}{h^2} F - \frac{\rho}{G} \ddot{F} = 0. \quad (1)$$

При этом поперечный прогиб w , вектор углов поворота Ψ , вектор поперечных сил N и тензор моментов M вычисляются по формулам:

$$w = -\Phi + \frac{h^2}{6\Gamma(1-\mu)} \Delta\Phi - \frac{\rho h^2}{12G\Gamma} \ddot{\Phi},$$

$$\Psi = \nabla\Phi + \nabla F \times n,$$

$$N = D\nabla\Delta\Phi - \frac{\rho h^3}{12} \nabla\ddot{\Phi} + Gh\Gamma \nabla F \times n,$$

$$M = D \left[(1-\mu)\nabla\nabla\Phi + \mu\Delta\Phi + \frac{1-\mu}{2} (\nabla\nabla F \times n - n \times \nabla\nabla F) \right].$$

где: $D = Eh^3 / 12(1-\mu^2)$ – цилиндрическая жесткость оболочки; $Gh\Gamma$ – жесткость на сдвиг, $G = E/2(1-\mu)$, Γ – коэффициент поперечного сдвига, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, ρ – объемная плотность массы, h – толщина оболочки либо пластины, n – вектор единичной нормали к плоскости оболочки, $a = E-nn$, E – единичный тензор.

В данной теории существует три спектра собственных частот, для которых справедливы следующие оценки:

$$\omega_i^{(1)} = h\omega_{1i}^{(1)} + h^2\omega_{2i}^{(1)} + \dots$$

$$\omega_i^{(2)} = \sqrt{\frac{12G\Gamma}{\rho h^2}} + \omega_{0i}^{(2)} + \dots, \quad \omega_i^{(3)} = \sqrt{\frac{12G\Gamma}{\rho h^2}} + \omega_{0i}^{(3)} + \dots \quad (2)$$

Под номер один спектр с низкими частотами. Частоты преимущественно изгибные (тоже самое описывал Кирхгоф в своих работах). Номер два занимает радиальный спектр, а под номер три повторно изгибной спектр. Наличие номера один и два объясняется инерционными силами, а так же изменение геометрических параметров поперечным сдвигом (спектр под номером два и три с работах Кирхгофа не описаны).

Рассмотрим замкнутую оболочку, шарнирного опирания с нижней стороны. С верхней стороны произвольные граничные условия. Рассматриваются колебания, симметричные относительно осей $x=0$, $y=0$ [16, 17]. Собственные формы, удовлетворяющие дифференциальным уравнениям и граничным условиям, имеют вид:

$$\Phi_n(x, y) = [C_{1n} \cos(\lambda_{1n}x) + G_{2n} \cos(\lambda_{2n}x)] \cos(\mu_n y) + \Phi_3(t),$$

$$F_n(x, y) = C_{3n} \sin(\delta_n x) \sin(\mu_n y),$$

$$\mu_n = \frac{(2n-1)\pi}{2b}, \quad \lambda_{1n} = \sqrt{A_n - B_n}, \quad \lambda_{2n} = \sqrt{A_n - B_n},$$

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\rho\omega_n^2}{G} - \frac{12\Gamma}{h^2 - \mu_n^2}}, \quad A_n = \left[\frac{1 + \Gamma(1-\mu)}{2} \right] \frac{\rho\omega_n^2}{(2G\Gamma) - \mu_n^2},$$

$$B_n = \sqrt{\frac{\rho h}{D} + \left(\left[\frac{1-\Gamma(1-\mu)}{2} \right] \frac{\rho\omega_n^2}{(2G\Gamma)} \right)^2}. \quad (3)$$

Удовлетворение граничным условиям сводит задачу к решению систем линейных однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов C_{1n} , C_{2n} , C_{3n} . Из условий равенства нулю определителя этой системы получается уравнение для определения собственных частот.

Перейдем к решению задачи расчета частоты колебаний тонкостенной оболочки несущую дополнительную массу, жестко защемленную с нижней стороны, а с верхней стороны имеющую произвольные граничные условия. Тогда собственные формы, удовлетворяющие

дифференциальным уравнениям и условиям жестко опирания имеют вид:

$$\Phi_n(x, y) = C_{1n} \cos(\lambda_{1n}x) \cos(\mu_n y) + \Phi_3(t),$$

$$F_n(x, y) = C_{3n} \sin(\delta_n x) \sin(\mu_n y), \quad \lambda_{1n} = \sqrt{\frac{\rho}{G} \frac{\omega_{0n}^2}{1-\mu} - \mu_n^2}, \quad \delta_n = \sqrt{\frac{\rho}{G} \omega_{0n}^2 - \mu_n^2}, \quad \omega_{0n} = \omega_n^2 - \frac{12G\Gamma}{\rho h^2} - \frac{M}{M_0} \sin^2 \alpha x. \quad (4)$$

По результатам преобразований уточненная математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} D\Delta\Delta\Phi + \rho h \ddot{\Phi} - \frac{\rho h^3}{12} \left(1 + \frac{2}{\Gamma(1-\mu)}\right) \Delta\ddot{\Phi} + \frac{\rho^2 h^3}{12G\Gamma} (\ddot{\Phi}) \\ + \frac{M}{h} \delta(x-x_0, y-y_0) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \\ \Delta F - \frac{12\Gamma}{h^2} F - \frac{\rho}{G} \ddot{F} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Сравнительные результаты экспериментальных данных, численные результаты по традиционной модели и результаты нового решения, представлены на рисунке 8.

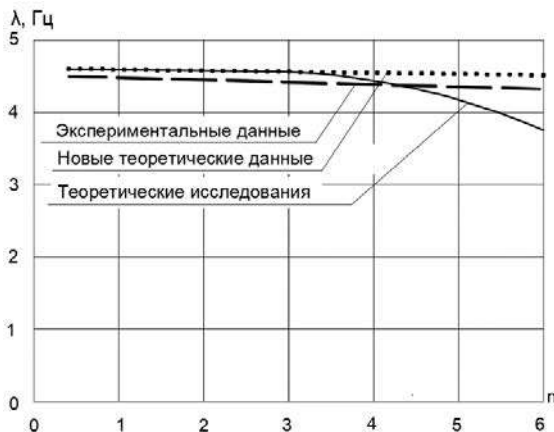


Рис. 7 - Зависимость первой частоты колебаний тонкостенной оболочки $D=200\text{мм}$, $L=450\text{мм}$, $b=0,5\text{мм}$ из стали X17.

Заключение

Результаты, полученные по новой математической модели отличаются менее чем на 5% от экспериментальных данных, тогда, как традиционная модель расчета отклоняется более чем на 15%. Нужно отметить, что с увеличением величины дополнительной массы происходит увеличение погрешности полученной математической модели.

Полученная расчетная модель, позволяет при перемещении морских нефтегазовых платформ проводить мониторинг состояния опор цилиндрического типа в режиме online, осуществляя контроль колебаний оболочек и отслеживать изменения их геометрической формы. При возникновении режимов колебаний, близких к резонансным, устройство мониторинга конструкций рассчитывает с помощью формул: $\lambda_{1n} = \sqrt{\frac{\rho}{G} \frac{\omega_{0n}^2}{1-\mu} - \mu_n^2}$, $\delta_n = \sqrt{\frac{\rho}{G} \omega_{0n}^2 - \mu_n^2}$, $\omega_{0n} = \omega_n^2 - \frac{12G\Gamma}{\rho h^2} - \frac{M}{M_0} \sin^2 \alpha x$, частоту колебаний конструкции при которой у оболочки наступает резонанс, затем на этой частоте нужно искусственно возбудить колебания оболочки опоры морских нефтегазовых платформ, но в противофазе. Это позволит избежать возможные техногенные катастрофы и сохранить человеческие жизни.

Литература

1. Пичугина Т.Б., Вокруг Света: Журнал Русского географического общества : сайт, - Москва, 2007 – Обновляется в течении суток. – URL: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/2938/> (дата обращения: 12.04.2021г.)
2. Центральное диспетчерское управление топливно-энергетического комплекса: Сайт Москва, 2018 – Обновляется в течении суток. – URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/10/525/ (дата обращения: 12.04.2021г.)
3. Как это сделано: Как строить нефтяную платформу: сайт, - Москва, 2018 – Обновляется в течении суток. – URL: <https://kak-eto-sdelano.ru/kak-stroili-neftyanuyu-platformu-troll-a/> (дата обращения: 12.04.2021г.)
4. Совкомфлот успешно завершил буксировку основания добывающей платформы «Беркут»: Neftegaz.ru : сайт, - Москва, 2012 – Обновляется в течении суток. – URL: <https://neftegaz.ru/news/drill/262787-sovkomflot-uspeshno-zavershil-buksirovku-osnovaniya-dobyvayushchey-platformy-berkut/> (дата обращения: 12.04.2021г.)
5. Власов, В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. Москва, Россия: Гостехиздат. 1954, 178 с.
6. Seregin, S.V. How Asymmetric Initial Imperfections in Shape Affect Free Oscillations of Thin Shells. Lecture Notes in Mechanical Engineering, p. 931-940. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_99.
7. Sysoev O. E., Dobryshkin A. Y., Nyein S. N., Baenhaev A. V. Investigation of the Influence of the Location of the Unified Mass on the Formed Vibrations of a Thin Containing Extended Shell. Materials Science Forum, 945, p. 885 – 892. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885.
8. Xing Y., Liu B., Xu T. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions. International Journal of Mechanical Sciences, 75, p. 178 – 188.

9. Qu, Y., Chen, Y., Long, X., Hua, H., Meng, G. (2013). Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method. *Applied Acoustics*, 74(3), p. 425 – 439.
10. Seregin, S.V. Influence of contact area of additional elements on frequency spectrum splitting in cylindrical shells. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (9783319956299), p. 261-266. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_28.
11. Qahorov, K.Q., Sysoev, Y.O., Dobryshkin, A.Y. The influence of concrete class on vibrations of thin-walled cylindrical reinforced concrete shells. 2018 *Materials Science Forum* 945 MSF, pp. 299-304 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.299
12. Dobryshkin, A.Y., Hlaing, M.K., Sysoev, O.E., Sysoev, E.O. Experimental validation of a mathematical model for forced vibrations of an open thin-walled cylindrical shell. 2020 *AIP Conference Proceedings* 2; <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0036658>
13. Sysoev, O.E., Dobryshkin, A.Y., Sysoev, E.O. Experimental Verification of the Mathematical Model of an Opened Thin-Wall Shell Forced Vibrations with a Small Attached Mass and a Rigidly Clamped Edges 2020 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 753(3),032025.
14. Dobryshkin, A.Y., Sysoev, O.E., Nyein, S.N. Modeling of the Opened Shell Forced Vibrations with a Small Associated Mass, with Hinged Operation by the Pade' Aproximation Method. 2020 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 753(3),032024 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032024"
15. Sysoev, O.E., Dobryshkin, A.Y., Naing, N.S., Baenkhaev, A.V. Investigation of the influence of the location of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell 2018 " *Materials Science Forum* 945 MSF, pp. 885-892 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885"
16. Qu, Y., Hua, H., Meng, G. (2013). A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries. *Composite Structures*, 95, p. 307 – 321. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.06.022.
17. Chen, M., Xie, K., Jia, W. Free and forced vibration of ring-stiffened conical-cylindrical shells with arbitrary boundary conditions. *Ocean Engineering*, p. 241–256. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.09.002

References

1. Pichugina T.B., *Around the World: Journal of the Russian Geographical Society: website*, - Moscow, 2007 - Updated within 24 hours. - URL: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/2938/> (date of access: 12.04.2021)
2. Central dispatching office of the fuel and energy complex: *Website Moscow*, 2018 - Updated within 24 hours. - URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/10/525/ (date of access: 12.04.2021)
3. How it was done: How to build an oil platform: *website*, - Moscow, 2018 - Updated within 24 hours. - URL: <https://kak-eto-sdelano.ru/kak-stroili-neftyanuyu-platformu-troll-a/> (date of access: 12.04.2021)
4. Sovcomflot has successfully completed the towing of the base of the Berkut production platform: *Neftegaz.ru: website*, - Moscow, 2012 - Updated within 24 hours. - URL: <https://neftegaz.ru/news/drill/262787-sovkomflot-ushpeshno-zavershil-buksirovku-osnovaniya-dobyvayushchey-platformy-berkut/> (date of access: 12.04.2021)
5. Vlasov, V.Z. *General theory of shells and its application in technology*. Moscow, Russia: Gostekhizdat. 1954, 178 s.
6. Seregin, S.V. How Asymmetric Initial Imperfections in Shape Affect Free Oscillations of Thin Shells. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 931-940. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_99.
7. Sysoev O. E., Dobryshkin A. Y., Nyein S. N., Baenkaev A. V. (2019). Investigation of the Influence of the Location of the Unified Mass on the Formed Vibrations of a Thin Containing Extended Shell. *Materials Science Forum*, 945, p. 885 – 892. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885.
8. Xing Y., Liu B., Xu T. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, p. 178 – 188.
9. Qu, Y., Chen, Y., Long, X., Hua, H., Meng, G. (2013). Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method. *Applied Acoustics*, 74(3), p. 425 – 439.
10. Seregin, S.V. Influence of contact area of additional elements on frequency spectrum splitting in cylindrical shells. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (9783319956299), p. 261-266. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_28.
11. Qahorov, K.Q., Sysoev, Y.O., Dobryshkin, A.Y. The influence of concrete class on vibrations of thin-walled cylindrical reinforced concrete shells. 2018 *Materials Science Forum* 945 MSF, pp. 299-304 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.299
12. Dobryshkin, A.Y., Hlaing, M.K., Sysoev, O.E., Sysoev, E.O. Experimental validation of a mathematical model for forced vibrations of an open thin-walled cylindrical shell. 2020 *AIP Conference Proceedings* 2; <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0036658>
13. Sysoev, O.E., Dobryshkin, A.Y., Sysoev, E.O. Experimental Verification of the Mathematical Model of an Opened Thin-Wall Shell Forced Vibrations with a Small Attached Mass and a Rigidly Clamped Edges 2020 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 753(3),032025.
14. Dobryshkin, A.Y., Sysoev, O.E., Nyein, S.N. Modeling of the Opened Shell Forced Vibrations with a Small Associated Mass, with Hinged Operation by the Pade' Aproximation Method. 2020 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 753(3),032024 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032024"
15. Sysoev, O.E., Dobryshkin, A.Y., Naing, N.S., Baenkhaev, A.V. Investigation of the influence of the location of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell 2018 " *Materials Science Forum* 945 MSF, pp. 885-892 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885"
16. Qu, Y., Hua, H., Meng, G. A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries. *Composite Structures*, 95, p. 307 – 321. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.06.022.

17. Chen, M., Xie, K., Jia, W. Free and forced vibration of ring-stiffened conical-cylindrical shells with arbitrary boundary conditions. Ocean Engineering, p. 241–256. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.09.002

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Олегович Сысоев, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство и Архитектуры» Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +79141853602; e-mail: fks@knastu.ru

Олег Евгеньевич Сысоев, доктор технических наук, доцент, декан факультета «Кадастра и Строительства» Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +79141853602; e-mail: fks@knastu.ru

Артем Юрьевич Добрышкин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и Архитектуры» Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +79098485668; e-mail: wwwartem21@mail.ru

Sysoev O. Evgeniy, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Architecture, Komsomolsk-na-Amure State University, Lenina, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation; e-mail: fks@knastu.ru

Sysoev E. Oleg, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Dean of the Faculty of Cadastre and Construction, Komsomolsk-na-Amure State University, Lenina, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation; e-mail: fks@knastu.ru

Dobryshkin Y. Artem, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Construction and Architecture, Komsomolsk-na-Amure State University, Lenina, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation; e-mail: wwwartem21@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.04.2021
Принята к публикации: 15.08.2021

УДК 629.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.002>

О разработке проекта требований правил Регистра Судоходства в части ограничения заливаемости

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

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Настоящая статья является четвертой из цикла статей, посвященных корректировке кодекса ИМО по устойчивости 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 заливаемости от скорости и интенсивности волнения для транспортных судов. Полученные формулы позволяют оценить указанный показатель 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 заливаемости.

On the development of the project of requirements of the rules of RS into account of limitations for flooding

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

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

Annotation. This article is the fourth in a series of articles devoted to the amendment 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 flooding on the speed and intensity of waves for transport vessels were obtained. The formulas obtained make it possible to estimate the indicated seaworthiness indicator. 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 developing a new International Convention on Load Mark 2000.

The proposed approach to the determination 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 amplitudes, pitching amplitudes, additional resistance on waves, the probability of flooding.

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 переоборудовании, сводящееся к удовлетворению возрастающих требований к прочности корпуса и реализации имеющихся запасов по основным критериям устойчивости (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, [1,2,3]. В настоящей, четвертой статье рассмотрены следующий показатель мореходности — заливаемость. 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 следующих пределах: коэффициент общей полноты, $\delta, 0,574 \div 0,820$; коэффициент полноты ватерлинии, $\alpha, 0,606 \div 0,857$; отношение $L/B, 5,6 \div 8,4$; отношение $B/T, 3,49 \div 4,98$.

1. Оценка вероятности заливаемости на встречном нерегулярном волнении

Исходными для формирования системы оценок заливаемости судна являются данные о колебаниях волны относительно его корпуса. Для случая движения судна вразрез двухмерному волнению относительные перемещения волны определяются соотношением [4,5]:

$$z(t) = \zeta_b(t) - \zeta_g(t) + x\psi(t), \tag{1}$$

где $\zeta_b(t)$ – ордината профиля волны у борта, $\zeta_g(t)$, $\psi(t)$ – вертикальная и килевая качка, x – расстояние от ЦТ судна до рассматриваемого сечения. Условие заливания палубы на расстоянии x от ЦТ судна может быть сформулировано так:

$$q_0(x) \geq H_q(x), \tag{2}$$

где $q_0(x)$ – амплитуда относительных колебаний волнового уровня, $H_q(x)$ – расчетная эффективная высота надводного борта судна, которая рассчитывается с учетом ходовой волны и изменением осадки судна при движении на тихой воде.

Тогда на нерегулярном морском волнении высота эффективного надводного борта по длине судна, вероятность заливания которого равна 5%, определяется зависимостью:

$$q(x)_{5\%} = 2,45\sqrt{D_{q(x)}}, \tag{3}$$

где $D_{q(x)}$ дисперсия относительных колебаний волнового уровня на расстоянии x от миделя.

В качестве расчетного частотного спектра реального морского волнения принят спектр, состоящий из суммы двух спектров, один из которых, определяет волнение в зоне максимума и высоко-частотной зоне, а второй – в зоне низких частот, рекомендованный [4,5].

На рис. 1,2 нанесены результаты расчета по разработанной программе амплитуд относительных колебаний волнового уровня по длине «базового» судна [2] в зависимости от интенсивности волнения и скорости.

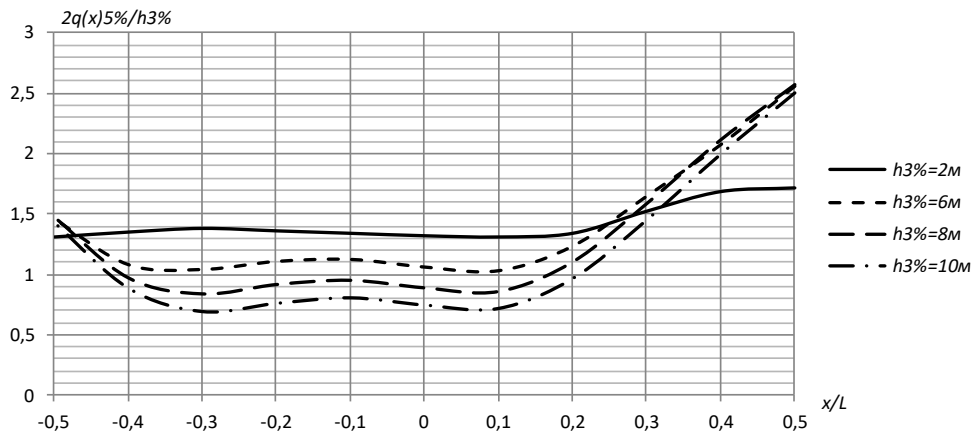


Рис. 1. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на нерегулярном волнении по длине судна в зависимости от интенсивности волнения. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$; $Fr = 0,14$

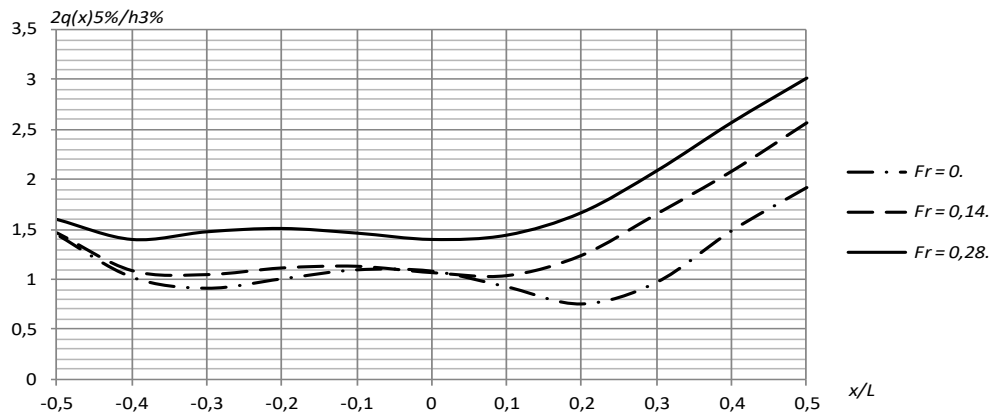


Рис. 2. Амплитуда относительных колебаний волнового уровня на нерегулярном волнении по длине судна в зависимости от скорости. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$; $h_{3\%} = 6,0$ м.

Для оценки заливаемости судна наибольший интерес представляют кривые относительных колебаний волнового уровня на носовом ($x = 0,5L$) и кормовом перпендикулярах ($x = -0,5L$), на мидельшпангоуте $x = 0,5$ и на втором теоретическом шпангоуте $x = 0,4L$.

2. Оценка заливаемости на носовом перпендикуляре

На рис.3 приведены кривые заливаемости на носовом перпендикуляре для «базового» судна от относительной длины нерегулярных волн $\bar{\lambda} = \lambda_c/L$ [2] при различной относительной скорости $Fr = \frac{v_0}{\sqrt{gL}}$.

На этом же рисунке линиями нанесены зависимости, рассчитанные по аппроксимирующей формуле (4).

$$\bar{q}_0 = \frac{2q_{0.5\%}}{h_{3\%}} = 2K_{q0\alpha}K_{q0\delta}K_{q0(B/T)} \times [(1,4 + 2Fr)(1 - e^{-60\bar{\lambda}/17}) - 6K_{q0(L/B)}\bar{\lambda}/17] \quad (4)$$

здесь: $K_{q0(L/B)}$, $K_{q0(B/T)}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на амплитуды колебаний волнового уровня; $K_{q0\delta}$, $K_{q0\alpha}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов общей полноты δ и полноты площади ватерлинии α на амплитуды колебаний волнового уровня.

Видно, что полученные приближенные формулы удовлетворительно согласуются с «точным» решением.

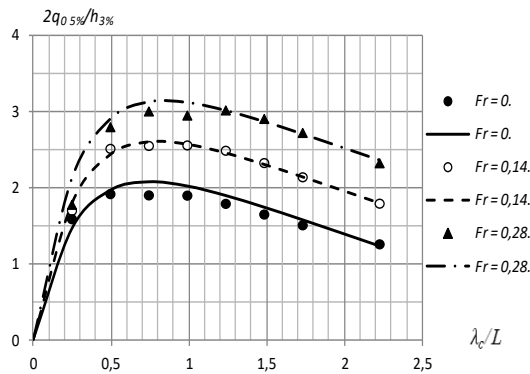


Рис. 3. Амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре в зависимости от скорости. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$

На рис. 4–7 показано как меняются амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре 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 $K_{q0(L/B)}$, $K_{q0(B/T)}$, $K_{q0\delta}$, $K_{q0\alpha}$ (5), (6), (7), (8).

$$K_{q0(L/B)} = 1,67 \left[0,407 \frac{L}{B} - 0,0255 \left(\frac{L}{B} \right)^2 - 1 \right] \quad (5)$$

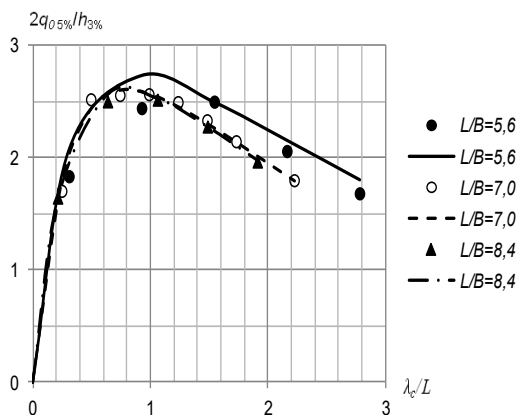


Рис. 4. Амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре в зависимости от L/B . $Fr = 0,14$; $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $B/T = 2,5$

$$K_{q0\alpha} = 5,1[1 + 0,92\alpha(\alpha - 1,9)] \quad (6)$$

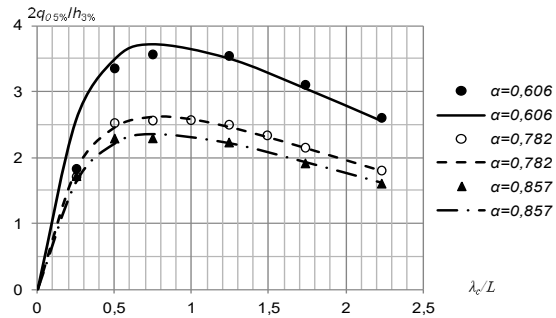


Рис. 5. Амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре в зависимости от α . $Fr = 0,14$; $\delta = 0,700$; $L/B = 7$; $B/T = 2,5$

$$K_{q0\delta} = 3,55\delta^2 - 3,73\delta + 1,88 \quad (7)$$

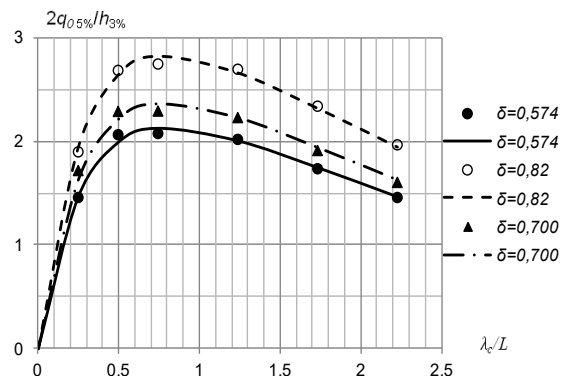


Рис. 6. Амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре в зависимости от δ . $Fr = 0,14$; $\alpha = 0,857$; $L/B = 7$; $B/T = 2,5$

$$K_{q0(B/T)} = 1 \quad (8)$$

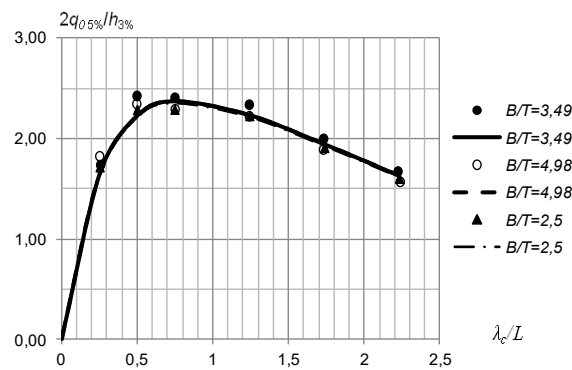


Рис. 7. Амплитуды колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре в зависимости от B/T . $Fr = 0,14$; $\delta = 0,699$; $\alpha = 0,857$; $L/B = 7$

3. Оценка заливаемости на 2-ом теоретическом шпангоуте

На рис.8 приведены кривые заливаемости на 2-ом теоретическом шпангоуте для «базового» судна от относительной длины нерегулярных волн при различной относительной скорости. На этом же рисунке линиями нанесены зависимости, рассчитанные по аппроксимирующей формуле (9).

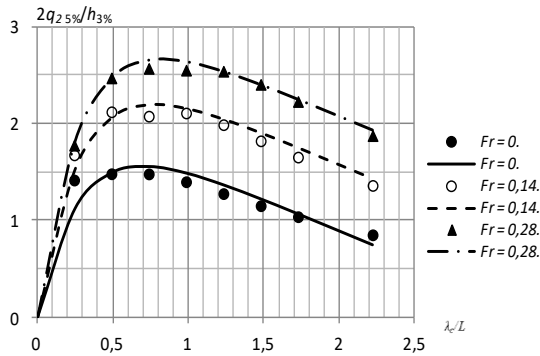


Рис.8. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 2-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от скорости. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$

$$\bar{q}_2 = \frac{2q_{2.5\%}}{h_{3\%}} = 2\kappa_{q2\alpha}\kappa_{q2\delta}\kappa_{q2(B/T)} \times [f_2(Fr)(1 - e^{-60\bar{\lambda}/17}) - 5,4\kappa_{q2(L/B)}\bar{\lambda}/17], \quad (9)$$

$$f_2(Fr) = 2,63Fr - 2,04Fr^2 + 1,07.$$

Где: $\kappa_{q2(L/B)}$, $\kappa_{q2(B/T)}$, – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на амплитуды колебаний волнового уровня; $\kappa_{q2\delta}$, $\kappa_{q2\alpha}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов полноты δ и α на амплитуды колебаний волнового уровня.

На рис. 9–10 сопоставлены результаты расчетов заливаемости на 2-ом теоретическом шпангоуте по программе (точки) и по приближенным формулам (линии) (10), (11), (12), (13).

$$\kappa_{q2(L/B)} = 0,0714 \frac{L}{B} + 0,5 \quad (10)$$

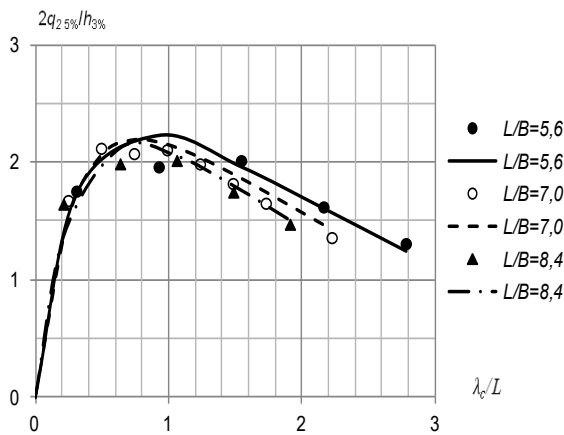


Рис.9. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 2-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от L/B . $Fr = 0,14$; $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $B/T = 2,5$

$$\kappa_{q2\alpha} = 5[1 + 0,79\alpha(\alpha - 2,07)] \quad (11)$$

$$\kappa_{q2\delta} = \kappa_{q0\delta} = 3,55\delta^2 - 3,73\delta + 1,88 \quad (12)$$

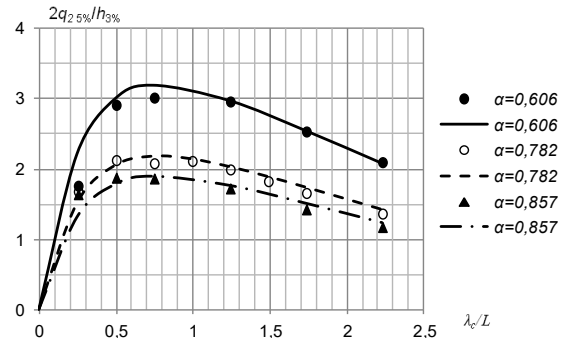


Рис.10. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 2-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от α . $Fr = 0,14$; $\delta = 0,700$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$

$$Fr = 0,14; \delta = 0,700; L/B = 7,0; B/T = 2,5$$

$$\kappa_{q2(B/T)} = \kappa_{q0(B/T)} = 1 \quad (13)$$

4. Оценка заливаемости на мидель-шпангоуте

На рис.11 приведены кривые заливаемости на мидель-шпангоуте для «базового» судна от интенсивности волнения при различной относительной скорости. Здесь же линиями нанесены зависимости, рассчитанные по аппроксимирующей формуле (14).

$$\bar{q}_{10} = \frac{2q_{10.5\%}}{h_{3\%}} = 1,4\kappa_{q10\alpha}\kappa_{q10\delta}\kappa_{q10(B/T)} \times [f_{10}(Fr)(1 - e^{-190\bar{\lambda}/17}) - 5,8\kappa_{q10(L/B)}\bar{\lambda}/17], \quad (14)$$

$$f_{10}(Fr) = 4,8Fr^2 - 0,5Fr + 1.$$

здесь: $\kappa_{q10(L/B)}$, $\kappa_{q10(B/T)}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на амплитуды колебаний волнового уровня; $\kappa_{q10\delta}$, $\kappa_{q10\alpha}$ – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов общей полноты δ и полноты площади ватерлинии α на амплитуды колебаний волнового уровня.

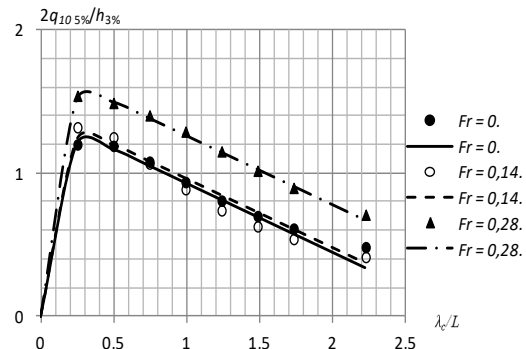


Рис.11. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 10-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от скорости. $\delta = 0,700$; $\alpha = 0,782$; $L/B = 7,0$; $B/T = 2,5$

На рис. 12–15 сопоставлены результаты расчетов заливаемости на мидель-шпангоуте по разработанной программе и по приближенным формулам (15), (16), (17), (18).

$$\kappa_{q10(L/B)} = 0,0714 \frac{L}{B} + 0,5 \quad (15)$$

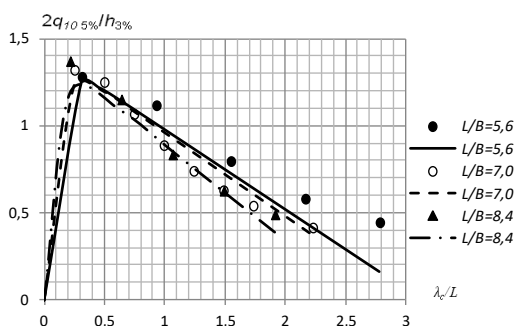


Рис. 12. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 10-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от L/B. Fr=0,14; delta=0,700; alpha=0,782; B/T=2,5

$$\kappa_{q10\alpha} = 4,03 + 4,5\alpha^2 - 7,4\alpha \quad (16)$$

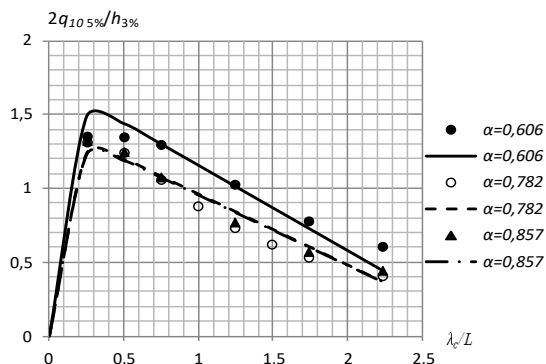


Рис. 13. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 10-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от alpha. Fr=0,14; delta=0,700; L/B=7,0; B/T=2,5

$$\kappa_{q10\delta} = \kappa_{q2\delta} = \kappa_{q0\delta} = 3,55\delta^2 - 3,73\delta + 1,88 \quad (17)$$

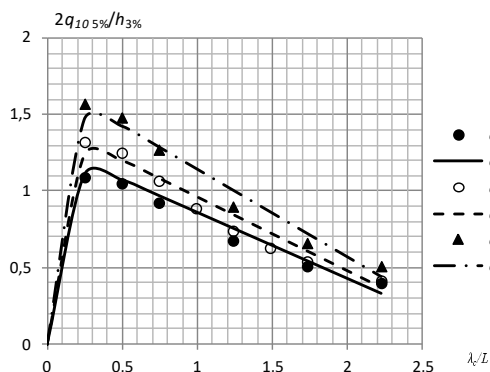


Рис. 14. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 10-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от delta. Fr=0,14; alpha=0,857; L/B=7,0; B/T=2,5

$$\kappa_{q10(B/T)} = \kappa_{q0(B/T)} = 1 \quad (18)$$

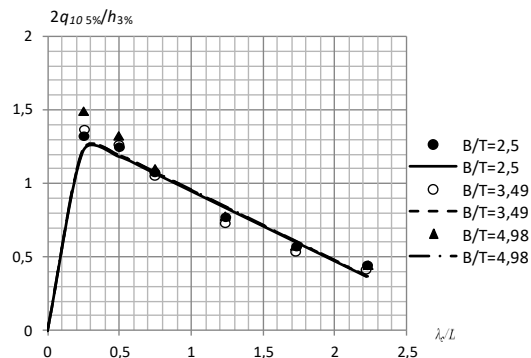


Рис. 15. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 10-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от B/T. Fr=0,14; alpha=0,857; delta=0,699; L/B=7,0

5. Оценка заливаемости на кормовом перпендикуляре

На рис.16 приведены кривые заливаемости на кормовом перпендикуляре (на 20-ом теоретическом шпангоуте) для «базового» судна от интенсивности волнения при различной относительной скорости. Здесь же линиями нанесены зависимости, рассчитанные по аппроксимирующей формуле (19).

$$\bar{q}_{20} = \frac{2q_{20 5\%}}{h_{3\%}} = 2\kappa_{q20\alpha}\kappa_{q20\delta}\kappa_{q20(B/T)} \times [f_{20}(Fr)(1 - e^{-60\bar{\lambda}/17}) - 3,5\kappa_{q20(L/B)}\bar{\lambda}/17], \quad (19)$$

$$f_{20}(Fr) = 1,7Fr^2 + 0,95.$$

Где: $\kappa_{q20(L/B)}$, $\kappa_{q20(B/T)}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние отношений L/B и B/T на амплитуды колебаний волнового уровня; $\kappa_{q20\delta}$, $\kappa_{q20\alpha}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние коэффициентов общей полноты delta и полноты площади ватерлинии alpha на амплитуды колебаний волнового уровня.

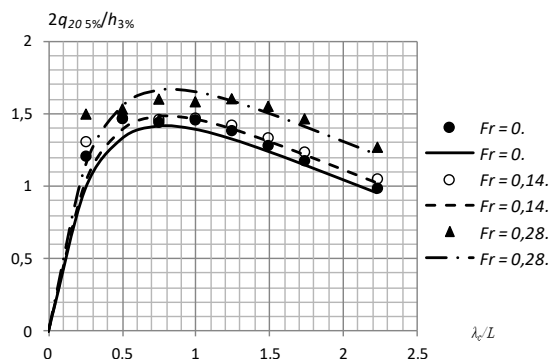


Рис. 16. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на 20-ом теоретическом шпангоуте в зависимости от скорости. delta=0,700; alpha=0,782; L/B=7,0; B/T=2,5

На рис. 17–20 сопоставлены результаты расчетов заливаемости на кормовом перпендикуляре по разработанной программе и с учетом расчета поправочных коэффициентов по приближенным формулам (20), (21), (22), (23).

$$\kappa_{q20(L/B)} = 1 \quad (20)$$

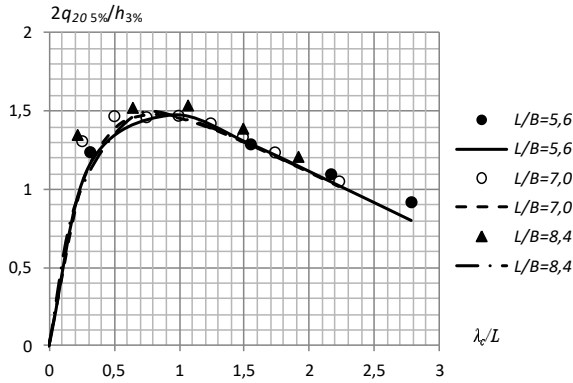


Рис. 17. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на кормовом перпендикуляре в зависимости от L/B .

$Fr=0,14; \delta =0,700; \alpha =0,782; B/T=2,5$

$$\kappa_{q20\alpha} = 2,2 - 1,56\alpha \quad (21)$$

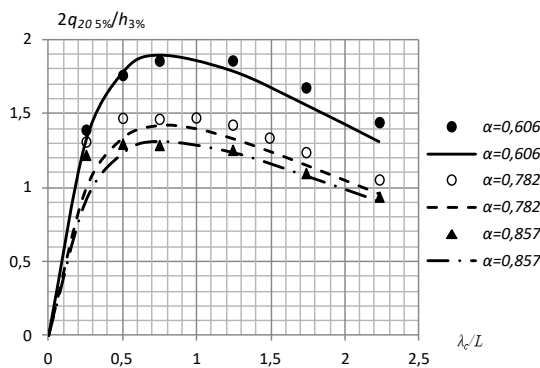


Рис. 18. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на кормовом перпендикуляре в зависимости от α .

$Fr=0,14; \delta =0,700; L/B=7,0; B/T=2,5$

$$\kappa_{q20\delta} = 0,77\delta + 0,46 \quad (22)$$

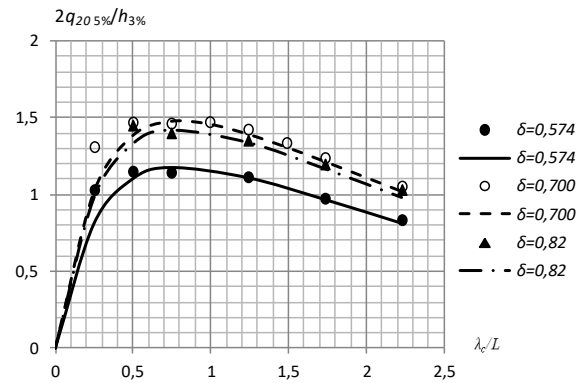


Рис. 19. Амплитуды относительных колебаний волнового уровня на кормовом перпендикуляре в зависимости от δ .

$Fr=0,14; \alpha =0,857; L/B=7; B/T=2,5$

$$\kappa_{q20(B/T)} = 0,0213 \left(\frac{B}{T}\right)^2 - 0,13 \left(\frac{B}{T}\right) + 1,19 \quad (23)$$

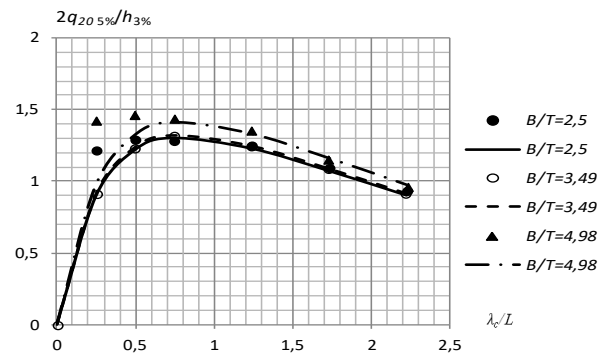


Рис. 20. Амплитуды колебаний волнового уровня на кормовом перпендикуляре в зависимости от B/T .

$Fr=0,14; \delta =0,699; \alpha =0,857; L/B=7$

Закключение

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

- амплитуд относительных колебаний волнового уровня на носовом перпендикуляре.
- амплитуд относительных колебаний волнового уровня на 2-ом теоретическом шпангоуте.
- амплитуд относительных колебаний волнового уровня на мидель-шпангоуте.
- амплитуд относительных колебаний волнового уровня на кормовом перпендикуляре.

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. Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС в части ограничений слеминга и оголения винта. Морские интеллектуальные технологии, №2, Т. 3, 2021
4. Справочник по теории корабля (Под ред. Я.И. Войткунского). Т.2. Л.: Судостроение. 1985.
5. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л., "Судостроение", 1982.

Refenersce

1. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS s utschetom korrrektirovki kodeksa IMO po ostoytschivosti v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki.[On the development of the draft requirements of the RS rules, taking into account the correction of the IMO code on stability in terms of the limitations of pitching] Morskie intellektualnye tekhnologii, №3 (45) T. 2, 2019, s.65-69
2. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS v tschasti ogranitscheniy prodolnoy katschki[On the development of the draft requirements of the RS rules in terms of the limitations of pitching]. Morskie intellektualnye tekhnologii, №3 (49) T. 1, 2020, s.15-20
3. Borisov R.V., Luzianin A.A. O razrabotke proekta trebovaniy pravil RS v tschasti ogranitscheniy sleminga I ogolenia vinta.[On the development of the draft requirements of the RS rules in terms of the limitations of slamming and bare propeller.] Morskie intellektualnye tekhnologii, №2, T. 3, 2021
4. Spravochnik po teorii korablya[Handbook of ship theory] (Pod red. YA.I. Voitkunskogo). T.2. L.: «Sudostroenie». 1985.
5. Borodai I.K., Necvetaev Y.A. Morehodnost sydov. [Seaworthiness of ships.]L.: «Sudostroenie». 1982.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

Поступила в редакцию: 29.04 2021
Принята к публикации: 15.08.2021

УДК 629.12.073.243.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.003>

Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно в условиях мелководья на основании использования трехмерной потенциальной теории

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

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается метод определения нелинейных дифракционных сил, действующих на судно в условиях мелководья на основании трехмерной потенциальной теории. Производится оценка влияния относительной глубины водоема H/T на данные нелинейные силы. Для нахождения нелинейных сил, требуется определение потенциалов второго порядка малости. Решение основано на методах малого параметра, интегральных уравнений Фредгольма и функции Грина для случая мелководья. Данное решение является новым для отечественной практики. При определении потенциалов второго порядка учитываются нелинейные граничные условия на свободной поверхности жидкости и на смоченной поверхности судна. На основании изложенного метода разработана программа расчета нелинейных сил при различных H/T . Приводятся результаты расчетов сил и моментов для трех различных типов судов. Приведено сравнение с расчетами, основанными на двумерной теории. Особое внимание уделяется учету потенциала набегающего волнения второго порядка. Учитывается его вклад в образовании нелинейных дифракционных сил. Приводится сравнение расчетов с учетом влияния данного потенциала и без него.

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

Determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship in shallow water conditions based on the use of three-dimensional potential theory

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

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

Abstract. The article discusses a method for determining nonlinear diffraction forces acting on a ship in shallow water conditions on the basis of a three-dimensional potential theory. The influence of the relative depth of the fluid H/T on these nonlinear forces is assessed. To determine them, it is necessary to calculate the potentials of the second order of smallness. The solution of the problem is carried out on the basis of small parameter methods, Fredholm's integral equations and Green's function for a fluid of limited depth. The presented solution in national practice is new. During the determination of the second order potentials, nonlinear boundary conditions on the free surface of the liquid and on the wetted surface of the ship are taken into account on the basis of methods program was developed, considering various H/T . The results of calculations of the forces and moments for three types of different ships are presented. Comparison with calculations based on two-dimensional theory is given. Special attention is paid to taking into account the potential of the second-order of incoming wave. Its contribution to the formation of nonlinear diffraction forces is taken into account. A comparison of calculations with and without the influence of this potential is given

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

Введение

Для расчетов амплитуд нелинейной качки на мелководье необходимо уметь определять соответствующие нелинейные силы, обусловленные влиянием набегающего и дифрагированного волнения.

Нелинейные силы второго порядка, обусловленные дифракцией и возникающие на мелководье, были подробно изучены на основании двумерной потенциальной теории в работе Со Чжо Ту [3]. В данной работе приведены результаты расчетов дифракционных сил и моментов, действующих на различные шпангоутные контура в зависимости от изменения относительной глубины. Показано значительное увеличение данных сил при уменьшении глубины. Также рассмотрено влияние на данные силы изменений отношения полуширины к осадке контура и коэффициента полноты [3].

В работах Papanikolaou [9], [10], Kim [5] решения задачи предлагаются на основании трехмерной теории, однако значения дифракционных сил в явном виде не приведены и не проводится анализ влияния относительной глубины на данные силы.

В работе авторов [1], был рассмотрен метод расчета и исследовано влияние мелководья на нелинейные силы второго порядка, обусловленные поперечными видами колебаний. В работе [2] предложен метод расчета нелинейных дифракционных сил. В настоящей статье рассматривается распространение данного метода на определение нелинейных дифракционных сил, действующих на судно в условиях мелководья.

Описание метода

Потенциал набегающего волнения первого порядка в случае жидкости ограниченной глубины потенциал первого порядка:

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

В жидкости ограниченной глубины имеет место потенциал второго порядка [9]:

$$\varphi_0^{(2)} = -i \frac{3}{8} a_{\omega_0}^2 \omega \frac{\operatorname{ch}(2\mu_0(z+H))}{\operatorname{sh}^4(\mu_0 H)} \cdot e^{i2\mu_0(x \cos \beta + y \sin \beta)}. \quad (2)$$

Данные потенциалы можно представить в виде суммы симметричной и несимметричной части [2]:

$$\begin{aligned} \varphi_0^{(1)} &= \varphi_{0S}^{(1)} + \varphi_{0A}^{(1)}, \\ \varphi_0^{(2)} &= \varphi_{0S}^{(2)} + \varphi_{0A}^{(2)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Потенциалы дифрагированного волнения первого и второго порядка могут быть представлены аналогичным способом:

$$\begin{aligned} \varphi_7^{(1)} &= \varphi_{7S}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)}, \\ \varphi_7^{(2)} &= \varphi_{7S}^{(2)} + \varphi_{7A}^{(2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

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 [8]:

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

Граничное условие на смоченной поверхности второго порядка имеет вид:

$$\frac{d\varphi_{7S}^{(2)}}{dn} = -\frac{d\varphi_{0S}^{(2)}}{dn}; \quad \frac{d\varphi_{7A}^{(2)}}{dn} = -\frac{d\varphi_{0A}^{(2)}}{dn} \quad (7)$$

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

$$\Phi_{77}^{(1)} = \varphi_{0S}^{(1)} + \varphi_{0A}^{(1)} + \varphi_{7S}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)}. \quad (8)$$

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

$$\Phi_{77}^{(2)} = \varphi_{7S}^{(2)} + \varphi_{7A}^{(2)}. \quad (9)$$

Подставляя выражение (8) в (6), можно получить граничные условия на свободной поверхности жидкости для симметричного потенциала и асимметричного

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_{7S}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \varphi_{7S}^{(2)} &= Q_{F77S} = -\frac{i\omega}{g} (\nabla \varphi_{7S}^{(1)})^2 - \\ &- \frac{i\omega}{g} (\nabla \varphi_{7A}^{(1)})^2 + \frac{i\omega}{2g} \varphi_{7S}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \varphi_{7S}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \varphi_{7S}^{(1)}}{\partial z} \right) + \\ &+ \frac{i\omega}{2g} \varphi_{7A}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \varphi_{7A}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \varphi_{7A}^{(1)}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_{7A}^{(2)}}{\partial z} - \frac{4\omega^2}{g} \varphi_{7A}^{(2)} &= Q_{F77A} = \\ &= -\frac{i\omega}{g} 2\nabla \varphi_{7S}^{(1)} \nabla \varphi_{7A}^{(1)} + \\ &+ \frac{i\omega}{2g} \varphi_{7S}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \varphi_{7A}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \varphi_{7A}^{(1)}}{\partial z} \right) + \\ &+ \frac{i\omega}{2g} \varphi_{7A}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \varphi_{7S}^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \varphi_{7S}^{(1)}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

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:

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

$$= -\frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{d\varphi_{0S}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F77S} G^{(2)} dS_F.$$

$$-\frac{1}{2} \varphi_{7A}^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \varphi_{7A}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \quad (13)$$

$$= -\frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{d\varphi_{0A}^{(2)}}{dn} G^{(2)} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_{F77A} G^{(2)} dS_F.$$

Полученные уравнения (12) и (13) 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.

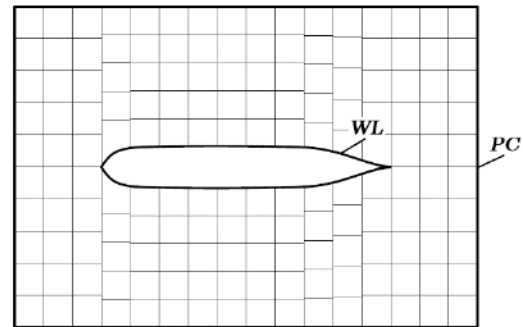


Рис. 1. Разбиение свободной поверхности на панели

Функция Грина $G^{(2)}$ может быть определена по формуле для жидкости ограниченной глубины [4]:

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

Здесь

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}; \\ r_1 &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}; \\ R &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}; \\ \nu &= \frac{\omega^2}{g} - \text{волновое число}; \end{aligned}$$

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

В выражениях (12) и (13) интеграл \iint_{S_F} берется по свободной поверхности. При численной

реализации свободная поверхность разбивается на прямоугольные панели (рис. 1), при этом сходимость интеграла обеспечивается достаточной протяженностью 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 [1] в данном случае также возникает необходимость обходить вторые производные в граничных условиях (10) и (11).

Граничные условия на свободной поверхности, содержащие вторую производную, можно представить следующим образом [2], [6],[7]:

$$\begin{aligned} \iint_{S_F} Q_{F77} G^{(2)} dS_F &= \iint_{S_F} Q_{F77_1} G^{(2)} dS_F + \\ &+ \iint_{S_F} Q_{F77_2} G^{(2)} dS_F; \\ Q_{F77_1} &= \\ &= -\frac{i\omega}{g} \left[\left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{i\omega}{2g} \Phi_{77}^{(1)} \left(-\frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (15)$$

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

Согласно [8], можно получить:

$$\iint_{S_F} \Phi_{77}^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{77}^{(1)}}{\partial z^2} G^{(2)} dS_F = \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &= - \iint_{WL+PC} \Phi_n^{(1)} (\nabla \Phi_n^{(1)} \cdot n) G^{(2)} dl + \\ &+ \iint_{S_F} (\nabla \Phi_n^{(1)} \nabla \Phi_n^{(1)}) G^{(2)} dS_F + \\ &+ \iint_{S_F} \Phi_n^{(1)} (\nabla \Phi_n^{(1)} \nabla G^{(2)}) dS_F. \end{aligned}$$

В выражении (16) \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:

$$\begin{aligned} p_{77}^{(2)} &= -\rho \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_0^{(2)} + \Phi_{77}^{(2)}) - \\ &- \frac{1}{2} \rho \cdot \text{grad}^2 (\Phi_{77}^{(2)}). \end{aligned} \quad (17)$$

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

Анализ результатов

На основании изложенного была разработана программа, реализующая определение нелинейных сил и моментов, обусловленных дифрагированным волнением с использованием функции Грина для жидкости ограниченной глубины (14) при различных H/T .

Расчеты нелинейных сил и моментов, проводились для трех различных типов судов 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
Сухогруз "Новгород"	138	20.6	9	0.68	0.79

Для валидации расчетного метода далее приводится сравнение нелинейных сил, полученных по трехмерной программе, с результатами, полученными при использовании двумерного метода [3] для лихтеровоза "Алексей Косыгин" и сухогруза "Новгород" при $H/T = 1.2; 1.5; 2.0$.

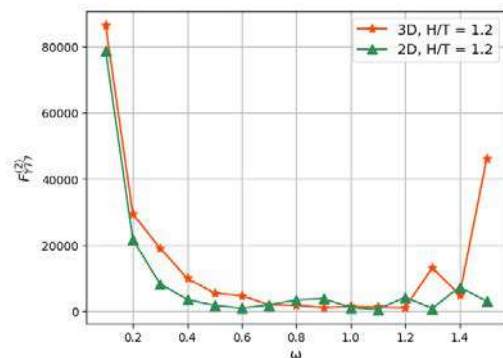


Рис. 2. Сравнение $F_{y77}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.2$

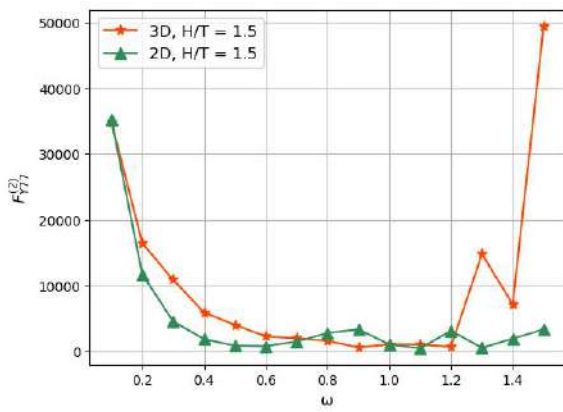


Рис. 3. Сравнение $F_{Y77}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.5$

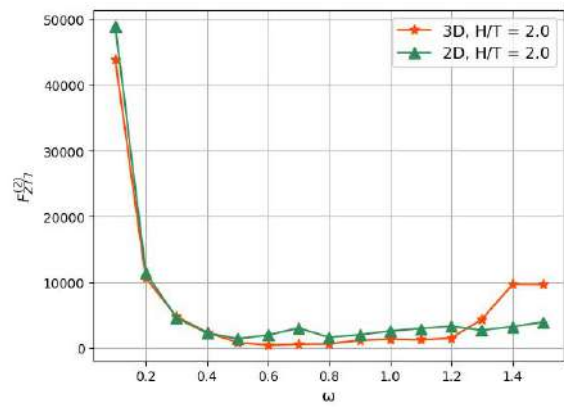


Рис. 6. Сравнение $F_{Z77}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 2.0$

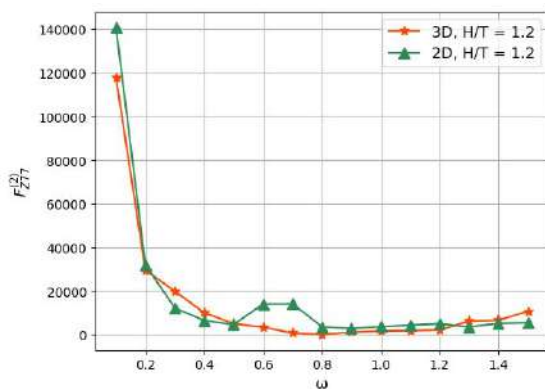


Рис. 4. Сравнение $F_{Z77}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.2$

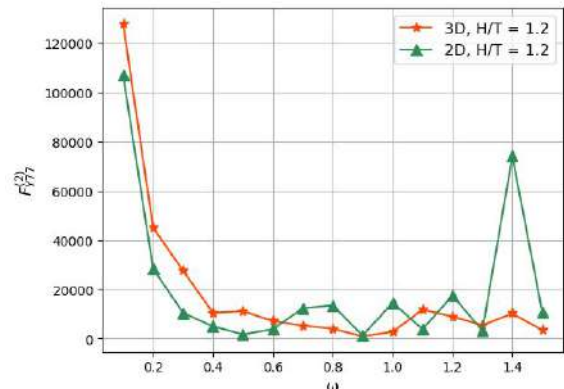


Рис. 7. Сравнение $F_{Y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.2$

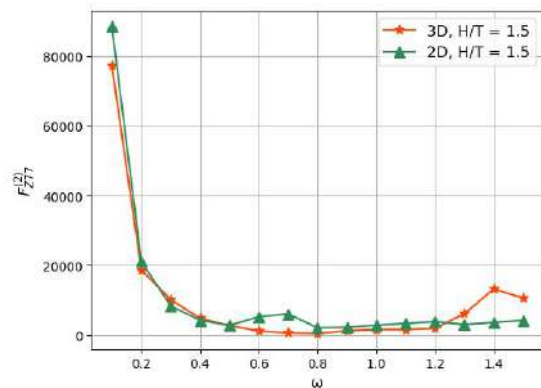


Рис. 5. Сравнение $F_{Z77}^{(2)}$ для сухогруза "Новгород" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.5$

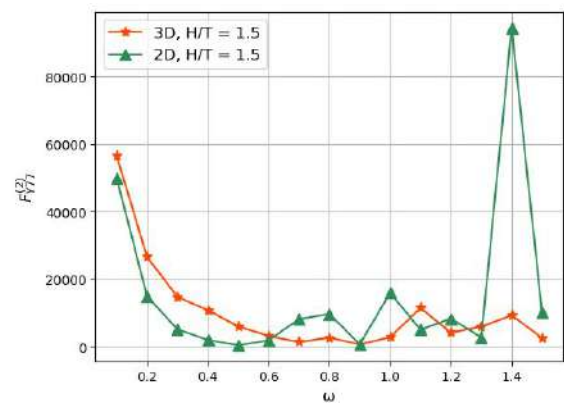


Рис. 8. Сравнение $F_{Y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.5$

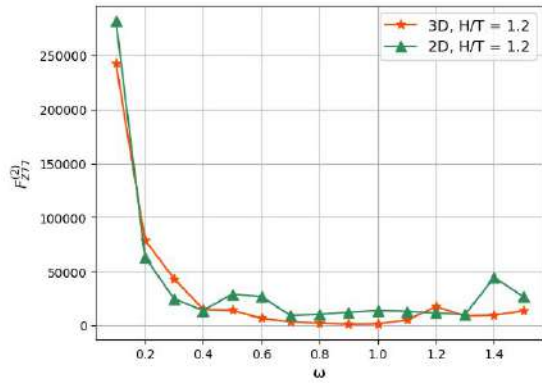


Рис. 9. Сравнение $F_{z77}^{(2)}$ для лихтеровоза “Алексей Косыгин” по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.2$

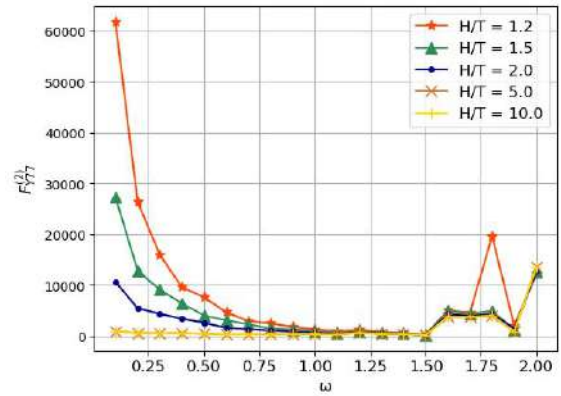


Рис. 12. $F_{y77}^{(2)}$ для танкера “Баскунчак” по трехмерной теории при различных H/T

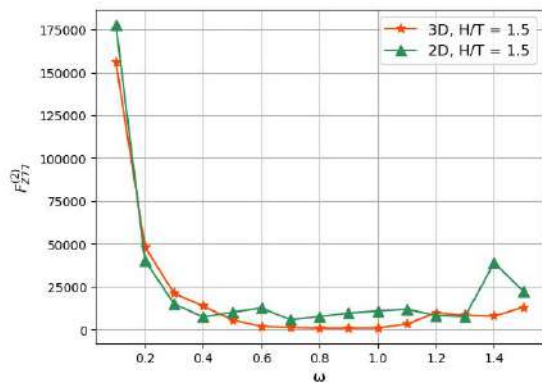


Рис. 10. Сравнение $F_{z77}^{(2)}$ для лихтеровоза “Алексей Косыгин” по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 1.5$

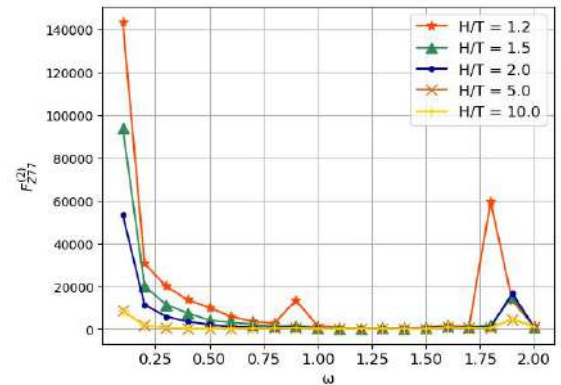


Рис. 13. $F_{z77}^{(2)}$ для танкера “Баскунчак” по трехмерной теории при различных H/T

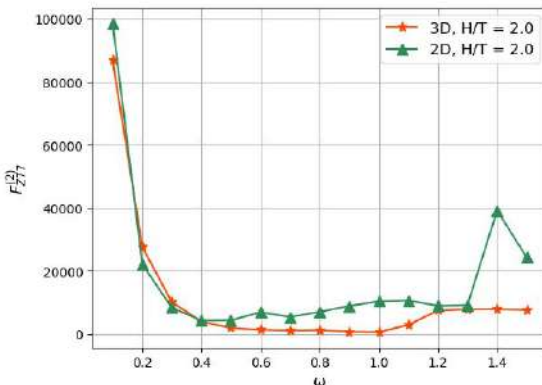


Рис. 11. Сравнение $F_{z77}^{(2)}$ для лихтеровоза “Алексей Косыгин” по двумерной и трехмерной теории при $H/T = 2.0$

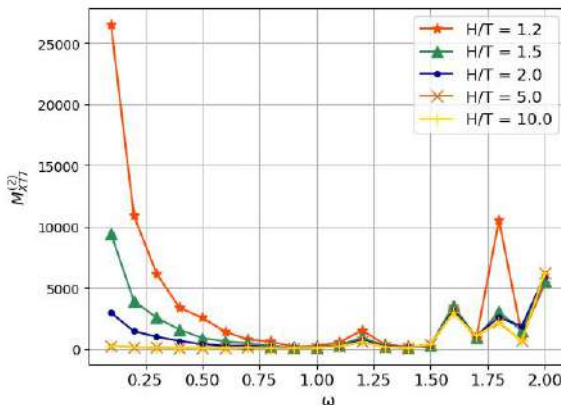


Рис. 14. $M_{x77}^{(2)}$ для танкера “Баскунчак” по трехмерной теории при различных H/T

На рис. 2-11 приведены сопоставления расчетов горизонтальных и вертикальных дифракционных сил, действующие на данные суда. Из приведенных результатов видно их хорошее согласование.

На рис. 12-21 представлены сравнения нелинейных сил при различных H/T , полученных по трехмерной теории для различных судов.

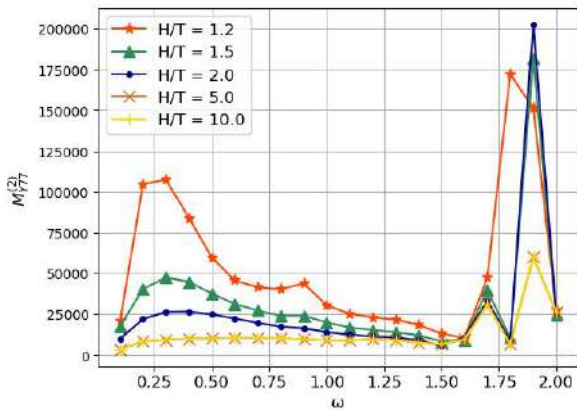


Рис. 15. $M_{Y77}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" по трехмерной теории при различных H/T

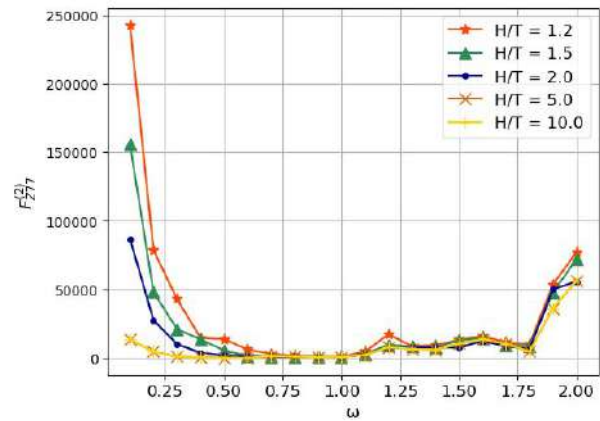


Рис. 18. $F_{Z77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по трехмерной теории при различных H/T

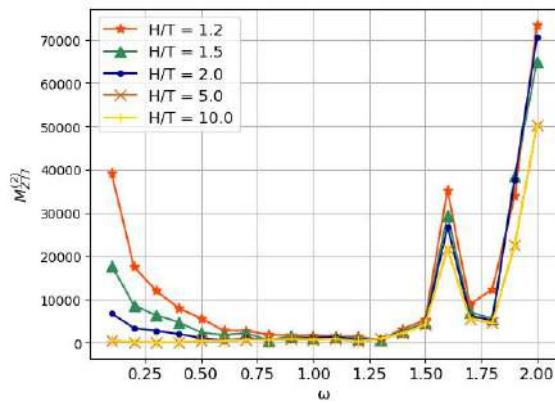


Рис. 16. $M_{X77}^{(2)}$ для танкера "Баскунчак" по трехмерной теории при различных H/T

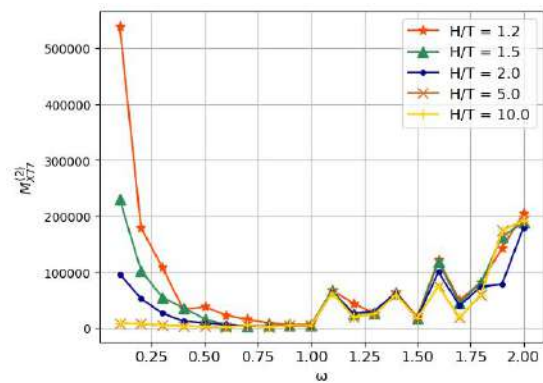


Рис. 19. $M_{Y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по трехмерной теории при различных H/T

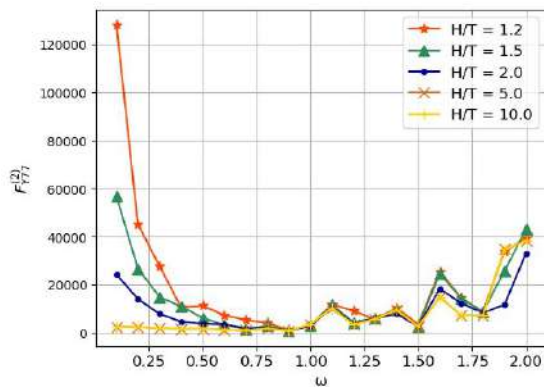


Рис. 17. $F_{Y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по трехмерной теории при различных H/T

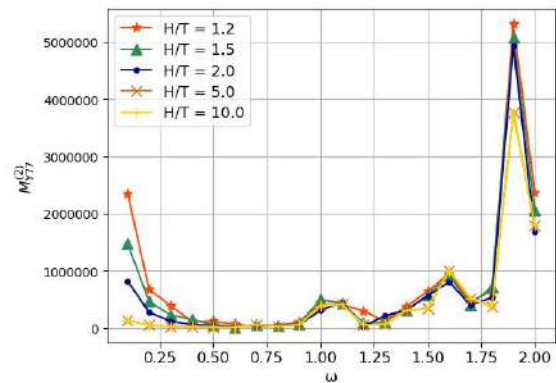


Рис. 20. $M_{Y77}^{(2)}$ для лихтеровоза "Алексей Косыгин" по трехмерной теории при различных H/T

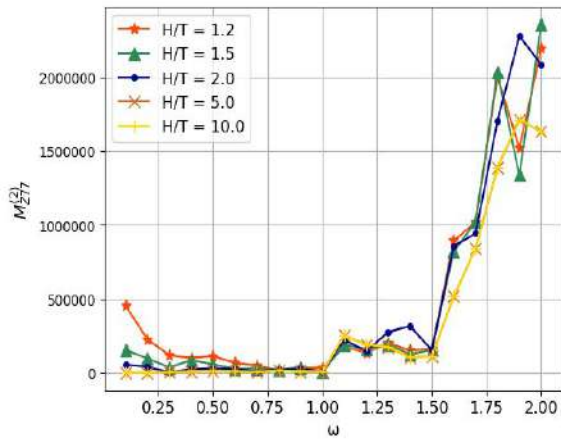


Рис. 21. $M_{277}^{(2)}$ для лихтеровоза «Алексей Косыгин» по трехмерной теории при различных H/T

Из приведенных результатов видно, что все нелинейные силы и моменты возрастают при уменьшении отношения H/T . Особенно выражено увеличение сил и моментов проявляется в диапазоне частот $\omega < 0.75$. Так, горизонтальная дифракционная сила, действующая на танкер «Баскунчак» при $H/T=1.2$ в 6 раз больше соответствующей силы при $H/T=2$ (рис.20). Аналогичное увеличение имеет место и с другими силами и моментами. Результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов, полученные для разных судов, качественно совпадают между собой, имеются количественные расхождения, связанные с размерами судов.

Для расчетов дифракционных сил в области высоких частот характерно явление «нерегулярных» частот, связанное с применением метода интегральных уравнений. Характерное увеличение значений сил на нерегулярных частотах имеет место для танкера «Баскунчак» при $\omega = 1.8$ (рис.13) и для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при $\omega = 1.9$ (рис. 20)

Отличительной чертой нелинейных дифракционных сил на мелководье является увеличение их значений не только в области высоких частот $\omega > 1.5$, но и в диапазоне частот $\omega < 0.75$ при уменьшении частоты, что обусловлено влиянием потенциала набегающего волнения второго порядка. При этом, в большинстве случаев, значения нелинейных дифракционных сил на низких частотах в несколько раз больше соответствующих значений на высоких (рис. 14, 18, 19)

Для оценки непосредственного влияния потенциала набегающего волнения второго порядка были проведены расчеты нелинейных дифракционных сил без его учета. В этом случае, выражения (12) и (13) вычислялись без учета интегралов по смоченной поверхности в правой части. Результаты сравнительных расчетов приведены на рис.22-27. Сравнения приведены для горизонтальной и вертикальной дифракционных сил для случаев относительной глубины $H/T=1.2, 2, 10$. Из приведенных результатов видно, что влияние потенциала второго порядка имеет место в диапазоне частот $\omega < 0.75$ и в наибольшей степени проявляется при малых H/T (рис. 22,25). В диапазоне частот $\omega > 0.75$ расчеты, выполненные с учетом потенциала набегающего волнения второго порядка

и без него полностью совпадают между собой. В этом диапазоне нелинейные дифракционные силы обусловлены исключительно влиянием нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. При относительной глубине $H/T=10$ влияние потенциала набегающего волнения второго порядка практически полностью исчезает (рис. 24, 27)

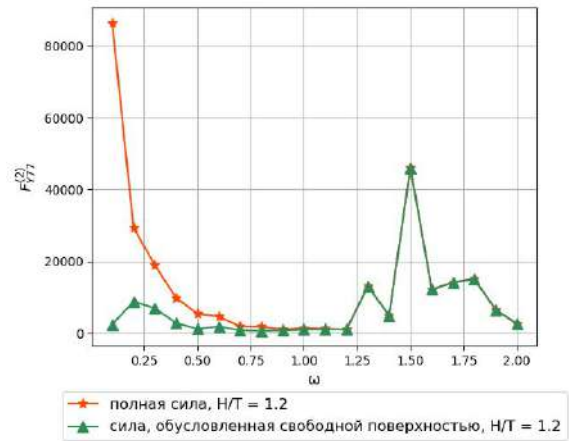


Рис. 22. $F_{Y77}^{(2)}$ для сухогруза «Новгород» по трехмерной теории при $H/T = 1.2$

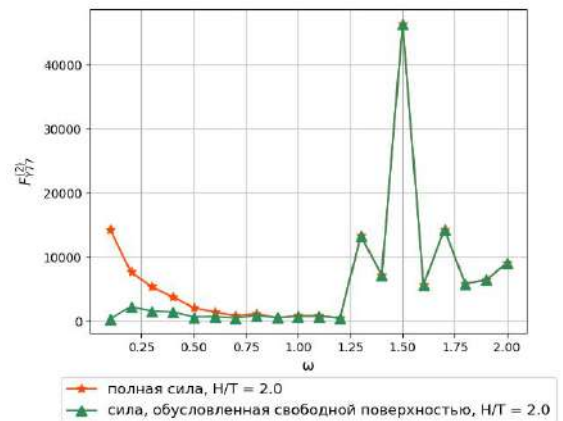


Рис. 23 $F_{Y77}^{(2)}$ для сухогруза «Новгород» по трехмерной теории при $H/T = 2.0$

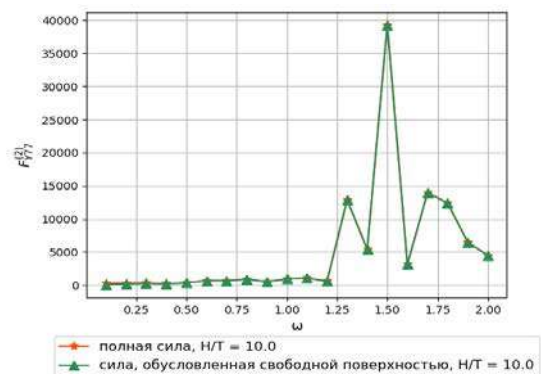


Рис. 24. $F_{Y77}^{(2)}$ для сухогруза «Новгород» по трехмерной теории при $H/T = 10.0$

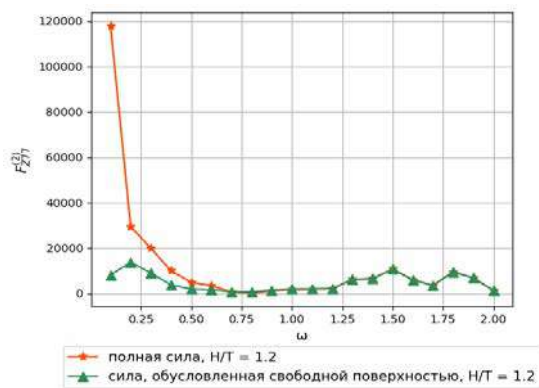


Рис. 25. $F_{z77}^{(2)}$ для сухогруза “Новгород” по трехмерной теории при $H/T = 1.2$

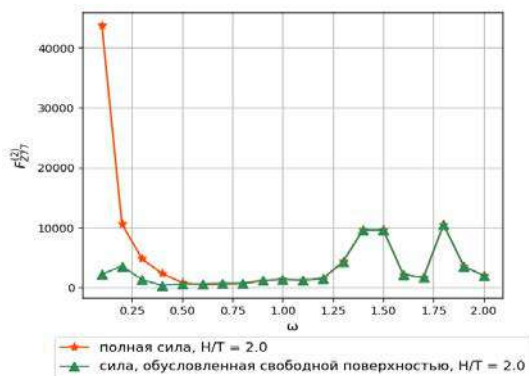


Рис. 26. $F_{z77}^{(2)}$ для сухогруза “Новгород” по трехмерной теории при $H/T = 2.0$

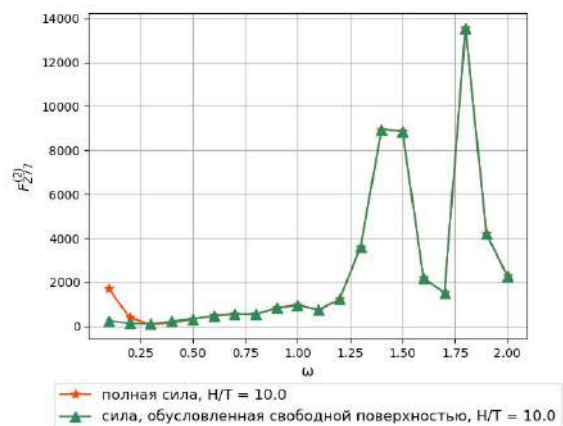


Рис. 27. $F_{z77}^{(2)}$ для сухогруза “Новгород” по трехмерной теории при $H/T = 10.0$

Таким образом, при больших относительных глубинах основной вклад в образование нелинейных дифракционных сил вносит нелинейность, обусловленная граничным условием на свободной поверхности, а потенциал набегающего волнения второго порядка необходимо учитывать при $H/T < 5$.

Заключение

В статье рассмотрен метод определения нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно в условиях мелководья. Показано значительное влияние уменьшения относительной глубины и влияния потенциала набегающего волнения второго порядка на данные силы. Использование трехмерного метода позволяет производить расчеты на любых курсовых углах. Разработанная авторами программа расчета может быть использована для судов любого типа и в дальнейшем использована для оценки амплитуд качки в супергармонических резонансных режимах.

Литература

1. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2020) Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, N4, т3. С.18-28
2. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. (2021) Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, N2, т3. С.20-28
3. Со Чжо Ту (2014) Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дис. – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.
4. John F. On the Motion of Floating Bodies // Comm. Pure and Applied Mathematics. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
5. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. //Applied Ocean Research, Vol.13, No.6. pp.287-296
6. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusettes institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
7. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
8. Ogilvie T. F. (1983) Second-order hydrodynamic effects on ocean platforms //Proceedings of the International Workshop on Ship and Platform Motions, Berkeley, C. 205-265.
9. Papanikolaou A., Zaraphonitis G. (1987) On the Second-Order Steady Motions of 3D Bodies in Waves //Proc. Second Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Bristol., p. 89-94.
10. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, N 6, с.165-185

References

1. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2020) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovod'e.[The determination of nonlinear forces of the second order during the laterale motions of the ship in shallow water] Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4, т3. S.18-28

2. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. (2021) Opredelenie nelineynykh difraktsionnykh sil второго порядка, deystvuyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoy teorii.[The Determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory] *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, N2, t3. S.20-28.
3. So Chzho Tu (2014) Razrabotka metoda rascheta nelinejnykh sil второго порядка, 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 morskoy tekhnicheskij universitet.
4. John F. On the Motion of Floating Bodies // *Comm. Pure and Applied Mathematics*. – 1950. – vol. 3. – pp. 45-1014.
5. Kim M.H. (1991) Second-order sum-frequency wave loads on large-volume structures. // *Applied Ocean Research*, Vol.13, No.6. pp.287-296.
6. Lee C. H. Wamit. (1995) Theory manual //Report N 95-2. Massachusetts institute of technology Department of Ocean Engineering, Cambridge.
7. Lee C. H., Zhu X. (1993) Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th Int'l Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada. p.165-185.
8. Ogilvie T. F. (1983) Second-order hydrodynamic effects on ocean platforms //Proceedings of the International Workshop on Ship and Platform Motions, Berkeley, C. 205-265.
9. Papanikolaou A., Zaraphonitis G. (1987) On the Second-Order Steady Motions of 3D Bodies in Waves //Proc. Second Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Bristol., p. 89-94.
10. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N (1993), Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // *Marine Structures*, N 6, c.165-185

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктория Юрьевна Семенова, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. 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: 05.07.2021

Принята к публикации: 10.08.2021

Численное исследование работы гребных лопаток

С.И. Чепурко¹ e-mail: kgm@smtu.ru, А.Ю. Яковлев¹ e-mail: kgm@smtu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Гребные лопатки являются основным рабочим органом движителей, использующих для создания тяги силу сопротивления движению тела в жидкости. К таким движителям традиционно относятся гребные колеса, весельные движители и ряд бионических движителей живых существ. Целью работы является исследование и выявление гидродинамических особенностей работы гребных лопаток. Исследование выполнено с помощью численного моделирования работы лопаток в пакете OpenFoam. Для моделирования движения лопаток используется технология подвижных сеток. Алгоритм проведения расчетов был верифицирован на основе известных экспериментальных данных движения плохообтекаемых тел в жидкости. Исследовательские расчеты проводились в плоском и трехмерном случае, при четырех значениях числа Струхала. Было выявлено образование шахматной дорожки вихрей переменного шага за движущейся лопаткой. Механизм возникновения этих вихрей, параметры и диапазон скоростей их существования существенно отличаются от известного решения Кармана для вихревой дорожки. Так же был подтвержден сугубо нестационарный характер сил, действующих на лопатке, и определена зависимость этих сил от числа Струхала.

Ключевые слова: Гребной движитель, гребная лопатка, бионический движитель, тяга, число Струхала, режим работы, CFD-расчет, сопоставление с экспериментом

Numerical modeling of paddling blades activity

Sergey I. Chepurko¹ e-mail: kgm@smtu.ru, Aleksey Yu. Yakovlev¹ e-mail: kgm@smtu.ru

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paddling blades are the main working body of the propulsors, which use resistance force of the body movement of in liquid to create the thrust. Such propulsors traditionally include paddle wheels, paddles, and a number of bionic propulsors of living things. The purpose of the work is to study and identify the hydrodynamic features of the paddling blades. The study was performed using numerical simulation of the blades operation in the OpenFOAM package. The technology of movable grids is used to simulate the blades movement. The calculation algorithm was verified on the basis of known experimental data on the poorly-flowing bodies motion in a liquid. The research calculations were carried out in the flat and three-dimensional case, with four Strouhal number values. The formation was revealed of a checkerboard vortices track with variable pitch behind the moving blade. The occurrence mechanism of these vortices, the parameters and the range of velocities of their existence differ significantly from the known Karman solution for a vortex path. The purely non-stationary nature was also confirmed of the forces acting on the blade, and the dependence was determined of these forces on the Strouhal number.

Key words: paddling propulsor, paddling blade, bionic propulsor, thrust, Strouhal number, propulsor mode, CFD-calculation, comparison with experiment

Введение

Тяга большинства современных движителей создается за счет отбрасывания масс воды, что позволяет отнести их к реактивному типу [1]. Однако способы создания реактивной тяги могут существенно различаться. Движители, создающие тягу за счет формирования подъемной силы на крыловидных элементах обладают наилучшим КПД и как следствие наиболее популярны. К ним относятся гребные винты и их разновидности, включая гребные винты в насадках, а так же крыльчатые движители.

В то же время, хорошо известен принцип создания тяги за счет другой компоненты силы – силы сопротивления. Этот способ характерен для движителей, которые мы далее будем называть гребными. К ним относятся весельные движители, гребные колеса и ряд бионических движителей живых существ. Уступая гребным винтам по КПД [1], эти движители способны развивать большую тягу и быстро менять вектор ее приложения [2], как следствие, гребные движители могут представлять интерес для специфических условий эксплуатации. Примером может служить успешная эксплуатация гребных колес на современных речных судах и разработки для амфибийных аппаратов [3]. При этом

конструкция современных гребных колес отличается от их исторического облика целым рядом усовершенствований [4]. Интерес исследователей к гребным движителям подогревают примеры использования данного принципа движения в живой природе, поскольку считается, что неудачные движители неизбежно были бы отброшены в процессе естественного отбора. К числу таких примеров можно отнести движение водоплавающих птиц [5], [2], и в определенной степени медуз [6].

В связи с сохраняющимся интересом к движителям гребного типа проводятся исследования гидродинамических особенностей их работы. Наряду с классическими примерами отрывного обтекания тел [7], известны современные исследования работы гребных лопаток [8], а в последнее время приобрели популярность CFD-расчеты работы движителей живых существ [6]. В последнем случае исследователи стремятся понять причины сложных движений движительных органов и увидеть пути возможного совершенствования судовых движителей.

1. Постановка задачи

Как следует из приведенного выше обзора, исследования особенностей работы гребных лопаток

далеки от завершения. Несмотря на то, что принцип создания тяги гребной лопаткой в достаточной степени очевиден, особенности этого процесса изучены далеко не в полной мере. Процесс гребки носит существенно нестационарный характер и зависит от режима движения лопадки, который может варьироваться в широких пределах. В этой связи представляет интерес выявление особенностей процессов происходящих при работе гребных лопаток, что и является целью настоящей работы.

В качестве этапов достижения этой цели выступают следующие задачи:

- разработка метода CFD-моделирования движения гребной лопадки, включая построение сетки и рекомендации по используемым моделям течения и граничным и начальным условиям
- проведение верификации и валидации численного метода на известных примерах
- выполнение комплекса расчетов различных режимов движения лопадки, анализ картин течения и оценка гидродинамических сил, действующих на лопадку.

В конечном итоге должны быть получены зависимости силовых характеристик гребной лопадки на различных режимах ее работы. При этом собственно гребной движитель в данной работе не моделируется, а режим движения лопадки задается как функция ряда параметров.

2. Метод численного моделирования

Для численного исследования характеристик гребной лопадки используется пакет OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation) - свободно распространяемое программное обеспечение для проведения CFD-моделирования [9]. В данном пакете реализован эффективный сеточный метод контрольного объема.

2.1 Основные положения

Расчет турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости осуществляется путем решения системы уравнений Навье-Стокса в осреднениях Рейнольдса и уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \bar{F}_i + \frac{1}{\rho} \frac{(\bar{\tau}_{ij} - \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$$

где ρ - плотность жидкости, F – внешние силы, \bar{u} – вектор скорости, x_j – координаты пространства, τ_{ij} – компоненты тензора напряжений. Штрихом обозначены скорости турбулентных пульсаций, а чертой сверху – операция осреднения.

Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая модель k- ω SST, разработанная Ментером [10]. Данная модель основана на уравнениях переноса кинетической энергии k и псевдозавихренности ω . Так же была использована модель Ментера-Лэнгри [11], в рамках которой предусмотрен учет ламинарно-турбулентного перехода.

Для решения данной задачи был выбран нестационарный решатель overPimpleDyMFoam, использующий технологию overset для

моделирования динамических сеток. В этом случае используется два набора расчетных сеток: подвижная (мелкая) сетка вокруг исследуемого объекта и неподвижная (грубая) сетка расчетной области. В процессе моделирования подвижная сетка перемещается в пределах расчётной области с передачей данных между этими двумя сетками путем интерполяции.

2.2 Построение сетки

Подвижная сетка состоит из треугольных элементов, и изготавливается в пакете Pointwise. Неподвижная сетка строится с помощью утилиты blockMesh пакета OpenFOAM и состоит из прямоугольных элементов.

Далее обе сетки объединяются в одну, с указанием подвижной и неподвижной зоны (Рис. 1).

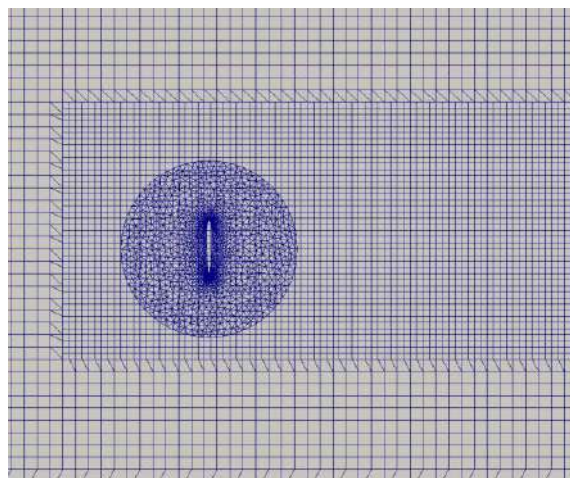


Рис. 1. Пример плоской сетки.

В связи с тем, что моделирование в пакете OpenFOAM производится с использованием метода контрольного объема, расчетные сетки в случае двумерного моделирования имеют одну ячейку в третьем направлении. В данной работе размер этой ячейки во всех случаях составлял 0,1 от хорды профиля.

Расчётная сетка для трехмерного случая содержит порядка 1 миллиона расчетных ячеек и представлена на рис. 2.

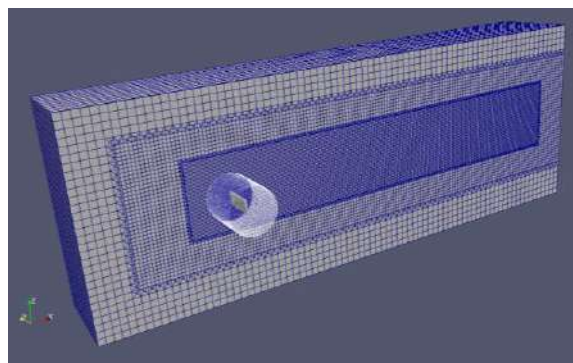


Рис. 2. Пример трехмерной сетки.

2.3. Граничные и начальные условия

Для решения задачи необходимо сформулировать граничные условия. На рис. 3

показаны границы расчетной области: АВ – входная граница; CD – выходная граница.

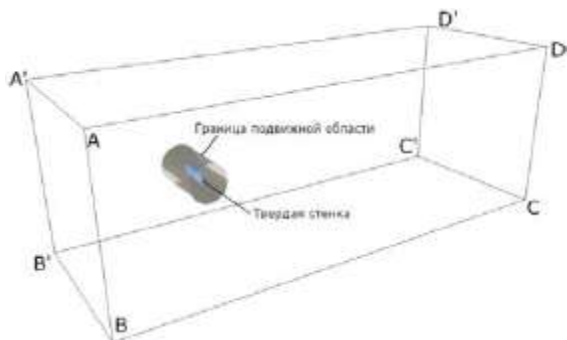


Рис. 3. Схема границ расчетной области

Граничные условия распределяются следующим образом:

На входной границе расчетной области ABB'A':

$$u = const$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

где p - давление, n – нормаль к границе

На выходной границе расчетной области CDD'C':

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

$$p = 0$$

На боковых границах расчетной области ABCD и A'B'C'D'

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

На твердой стенке (на поверхности лопатки) в связанной с ней системе координат:

$$u = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

На границе подвижной области по скорости и давлению ставится специализированное граничное условие *overset*:

Поскольку задача является нестационарной, полагается, что в начальный момент времени в расчетной области известны компоненты вектора скорости, давления, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации.

3. Тестовые CFD-расчеты

Верификация расчетной схемы проводится путем моделирования стационарного отрывного обтекания пластины, для которого известны классические экспериментальные данные [7]. Моделирование обтекания пластины было проведено при числе Рейнольдса $Re=3380$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (6)$$

где L – длина пластины, U – скорость набегающего потока, ν – кинематический коэффициент вязкости. Картина обтекания в сравнении с экспериментальными данными [7] приведена на рис. 4. Из сопоставления можно сделать вывод о правильном численном моделировании формы области отрывного обтекания и формировании в ней вихревых структур. Наличие фиксированных точек отрыва на торцах пластины в данном случае позволяет использовать URANS метод расчета, не прибегая к существенно более трудоемким LES и DNS методам.

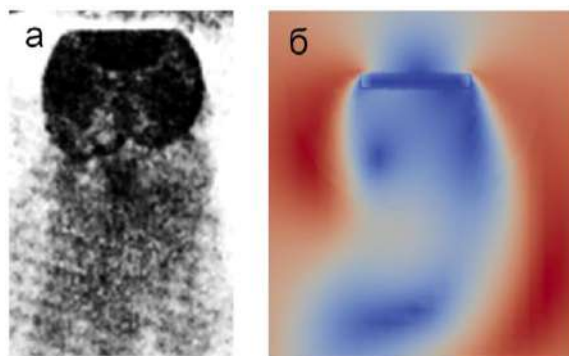


Рис. 4. Картины стационарного обтекания пластины при $Re=3380$. а – эксперимент [7], б – расчет (распределение величин скорости).

Для контроля правильности расчетной оценки силовых характеристик выполнялось сопоставление расчетной величины коэффициента сопротивления C_x с экспериментальными данными. Как известно, коэффициент сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 10^3 - 10^7$ у диска и пластины постоянен и равен $C_x=1,17$ в соответствии с экспериментом [12], в пространственном случае, и $C_x=2,0$ - в плоском случае [13]. Значение коэффициента C_x , полученного расчетным путем в плоском случае составило $C_x=1,98$, что подтверждает правильность выполнения численного моделирования.

Все силовые характеристики (в том числе и сопротивление) здесь и далее в работе обезразмерены следующим образом:

$$C_x = 2 \frac{X}{\rho U^2 LH} \quad (7)$$

$$C_y = 2 \frac{Y}{\rho U^2 LH}$$

где X и Y – продольная и поперечная силы, действующие на пластине или лопатке, H – ширина лопатки (в плоском случае равна толщине ячеек расчетной области).

3.1. Исходные данные для расчета

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

Рассматривались поступательные перемещения лопатки, ориентированной поперек потока. При этом была задана скорость потока, моделирующая движение под действием работы двигателя. Исследования проводились при числах Рейнольдса

порядка $Re=1 \cdot 10^6$, что условно соответствует движителю судна среднего водоизмещения.

Для исследования были выбраны режимы движения соответствующие различным числам Струхала $Sh=0,04; 0,08; 0,22; 0,52$ (см. таблицу 1):

$$Sh = \frac{L}{UT} \quad (8)$$

где U – скорость потока, L – длина лопадки, T – период гребка лопадки.

Кроме того, были рассмотрены два режима движения лопадки. Движение лопадки $x(t)$ в обоих случаях задавалось по закону, обеспечивающему торможение лопадки в начале и конце гребка:

$$x = \frac{a}{2} \cdot (1 - \cos(\pi \cdot t/T)) \quad (9)$$

где a – максимальное перемещение лопадки в процессе гребка, t – время.

В первом случае режима движения, лопадка двигалась перпендикулярно потоку, без вращения. Во втором случае она дополнительно поворачивалась, таким образом, чтобы встать вдоль потока в начале и конце гребка. Поворот осуществлялся по закону:

$$\beta = -\frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{2} + \text{arctg} \left(1 - x \right) \right] \quad (10)$$

где β – угол отклонения лопадки от положения поперек потока, \dot{x} – производная по времени от перемещения лопадки..

3.2. Картины течения при движении лопадки

На рис. 5, 6, 7, 8 представлены картины течения (величины скоростей) имеющие место при движении плоской лопадки по закону (9) с поворотом, осуществляемым по закону (10). Результаты приведены для чисел Струхала $Sh=0,52; 0,22; 0,08; 0,04$ в момент времени $t/T=0,5$, то есть в середине процесса гребка. Цветом на рисунках обозначены величины скорости, обезразмерены по скорости потока.

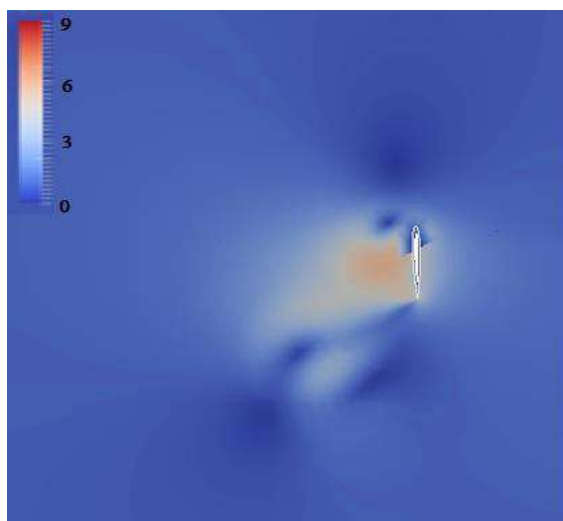


Рис. 5. Мгновенное распределение величин скорости вокруг движущейся гребной лопадки. Плоский случай. $Sh=0,52$. $t/T = 0,5$. Скорости обезразмерены по скорости потока.

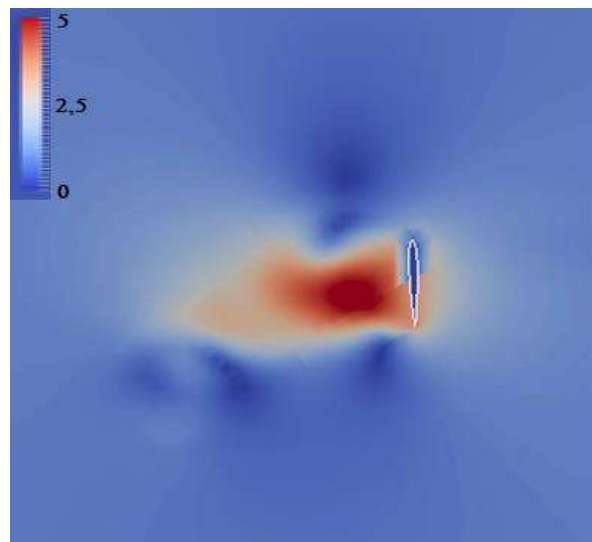


Рис. 6. Мгновенное распределение величин скорости вокруг движущейся гребной лопадки. Плоский случай. $Sh=0,22$. $t/T = 0,5$. Скорости обезразмерены по скорости потока.

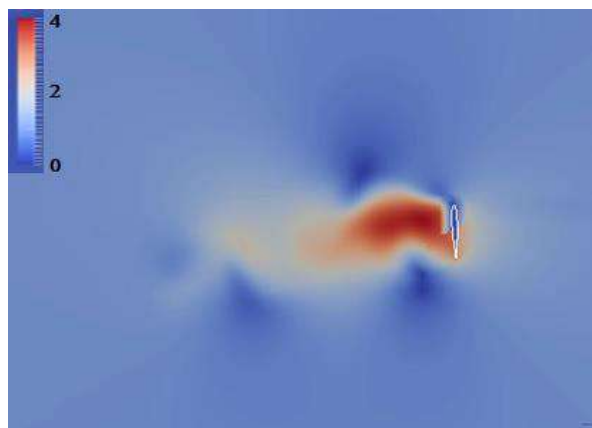


Рис. 7. Мгновенное распределение величин скорости вокруг движущейся гребной лопадки. Плоский случай. $Sh=0,08$. $t/T = 0,5$. Скорости обезразмерены по скорости потока.

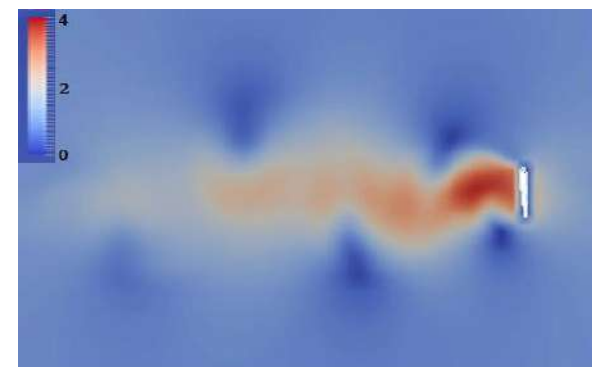


Рис. 8. Мгновенное распределение величин скорости вокруг движущейся гребной лопадки. Плоский случай. $Sh=0,04$. $t/T = 0,5$. Скорости обезразмерены по скорости потока.

Картины течения, возникающие при расчете движения трехмерной лопадки, имеют схожий характер. Распределение скоростей в случае

движения трехмерной лопатки для безразмерного момента времени $t/T=0,25$ при числе Струхала $Sh=0,22$ представлено на рис. 9.

Представленные результаты позволяют констатировать, что при движении пластины возникает характерная шахматная вихревая структура, подобная дорожке Кармана. Однако в данном случае движение лопатки имеет нестационарный характер, и вихревая структура характеризуется специфическими особенностями.

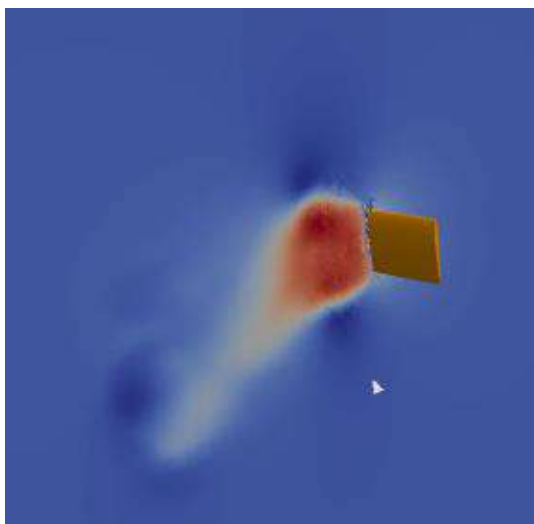


Рис. 9. Мгновенное распределение величин скорости вокруг движущейся гребной лопатки. Трехмерный случай, удлинение лопатки $H/L=3$. $Sh=0,22$. $t/T = 0,5$. Скорости обезразмерены по скорости потока.

Во первых шаг вихрей меняется в течении гребка лопатки в несколько раз. Во вторых расстояние между вихрями в дорожке так же изменяется в процессе гребка. По видимости изменение скорости движения лопатки служит в этом процессе основным механизмом генерирующим сход вихрей. Действительно, если следовать классическим экспериментальным результатам, то вихревая дорожка Кармана имеет место в диапазоне чисел Рейнольдса от 10 до 10^4 [14], что на два порядка меньше рассматриваемого случая. То есть вихри, в данном случае, представляют собой аналог разгонного вихря, а их характерное шахматное расположение возникает вследствие единых законов формирования устойчивых вихревых структур.

3.3. Силы, действующие на лопатке, в процессе гребка

Силы, действующие на лопатке в процессе выполнения гребка, можно разделить на постоянную и переменную составляющие. Выделение постоянной составляющей в данном случае весьма условно, поскольку процесс гребка сам по себе является нестационарным процессом. Тем не менее, можно оценить среднюю силу за время гребка, которая будет определять упор гребного движителя.

В таблице 1 приведены оценки безразмерных величин продольной и поперечной силы, приложенных к лопатке. Силы обезразмерены традиционным образом (7)

Возникновение поперечной силы связано с несимметричностью профиля $NACA0012$ в продольном направлении.

Таблица 1
Режимы работы и силы, действующие на гребной лопатке

Sh	Без поворота		С поворотом	
	C_x	C_y	C_x	C_y
0,04	1,18	0,07	0,70	0,07
0,08	1,78	0,11	1,37	0,12
0,22	2,37	0,09	1,15	0,05
0,52	3,47	0,21	2,53	0,58

Изменение сил на лопатке во времени заслуживает особого внимания. Такие зависимости для случая движения лопатки с поворотом и без поворота представлены на рис. 10 и 11. Видно, что сила на гребной лопатке за время гребка меняется кардинальным образом.

Для обоих режимов движения лопатки достижение максимальной силы наблюдается в середине цикла гребка. Причем сила на вращающейся лопатке оказывается заметно меньше, чем в отсутствии вращения. В начале и конце гребка для лопатки, движущейся с поворотом сила на ней резко возрастает и потом приходит в ноль. Выход в ноль определяется разворотом лопатки вдоль потока и резким падением сопротивления. Что касается резких скачков силы перед выходом в ноль, то они скорее всего связаны с неудачным выбором закона вращения лопатки. В дальнейшем, в случае использования в движителе поворотных лопаток, следует обратить отдельное внимание выбору такого закона. Для лопатки, движущейся без вращения, таких колебаний сил не наблюдается.

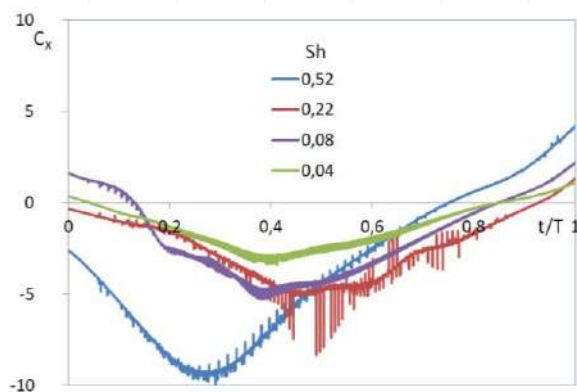


Рис. 10. Изменение продольной силы на лопатке в процессе гребка при разных значениях числа Струхала Sh . Движение лопатки без поворота.

В обоих случаях движения относительно более быстрые гребки (отвечающие большим величинам Sh) в среднем приводят к большим величинам сил на лопатке. Однако, подобия зависимости сил от времени при различных числах Струхала не наблюдается. Более того, в различные моменты времени максимальная сила достигается при разных числах Струхала.

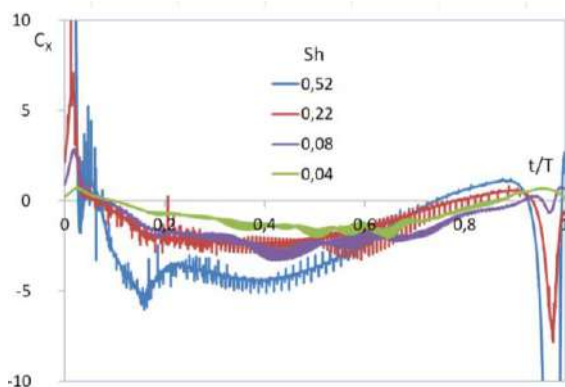


Рис. 11. Изменение продольной силы на лопатке в процессе гребка при разных значениях числа Струхалия Sh . Движение лопатки с поворотом.

Интересной особенностью всех полученных зависимостей сил от времени является наличие периодических колебаний этих сил. Можно выделить плавные колебания относительно слабой амплитуды, наиболее заметные при малых числах Струхалия. Эти колебания логично объяснить периодическим сходом вихрей (см. картины течения на рис. 6 - 10). Наряду с этими колебаниями на графиках хорошо видны сильные пульсации сил, происходящие на относительно больших частотах. Эти колебания требуют более углубленного изучения.

Заключение

В рамках данной работы были получены следующие результаты:

- Разработан алгоритм проведения расчетов гребных лопаток в пакете OpenFoam с применением технологии подвижных сеток.
- Была выполнена валидация и верификация разработанного алгоритма на примере известных экспериментальных данных, а так же продемонстрирована сеточная сходимость.
- Был проведен комплекс расчетов движения гребных лопаток при различных числах Струхалия в плоском и трехмерном случае

На основании проведенных расчетов можно констатировать следующее:

- Нестационарное движение гребных лопаток приводит к формированию шахматной вихревой структуры переменного шага. Эта структура внешне напоминает дорожку Кармана, но имеет другие механизмы образования и наблюдается при существенно больших числах Рейнольдса
- Силы действующие на лопатках в процессе гребка имеют сугубо нестационарный характер. Причем можно выделить плавные изменения силы во времени, обусловленные непосредственным движением лопатки и колебания силы, вызванные, по всей видимости сходом вихрей.
- Осредненные величины коэффициентов сил, приложенных к лопатке, характеризуют гребной движитель как тяжело нагруженный. С ростом числа Струхалия нагрузка движителя возрастает.

Литература

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители, Л., Судостроение, 1988
2. Van Buren T., Floryan D. and Smits A.J. Bio-inspired underwater propulsors, arXiv:1801.09714v2 [physics.flu-dyn] 5 Jul 2018.
3. Pu H., Sun Yi, Yang Y., Ma Sh., and Gong Z. Modeling of the Oscillating-paddling Gait for an ePaddle Locomotion Mechanism, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013
4. Фальмонов Е.В. Колесный движительно-рулевой комплекс, патент РФ RU (11) 2 225 327(13) C2.
5. Gough W.T., Farina S.C., Fish F.E. Aquatic burst locomotion by hydroplaning and paddling in common eiders (*Somateria mollissima*), The Journal of Experimental Biology, 2015, 218, 1632-1638 doi:10.1242/jeb.114140
6. Sahin M., Mohseni K., Colin S.P. The numerical comparison of flow patterns and propulsive performances for the hydromedusae *Sarsia tubulosa* and *Aequorea Victoria*, The journal of experimental biology, 2009, 212, 2656-2667, doi:10.1242/jeb.025536.
7. Чжен П. Отрывные Течения. Том 2, М., Мир, 1972.
8. Kim D. Characteristics of Three-dimensional Vortex Formation and Propulsive Performance in Flapping Locomotion, Ph.D. thesis, California Institute of Technology Pasadena, California, 2010.
9. OpenFOAM [Электронный ресурс] <https://www.openfoam.com/>
10. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
11. Menter F. R., Langtry R., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, Springer Science + Business Media B.V. 2006.
12. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций, Л., Судостроение, 1983.
13. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям, М., Машиностроение, 1992
14. Мэрвин Е. Голдстейн, Аэроакустика, пер. с англ., М., Машиностроение, 1981

References

1. Artjushkov L., Achkinadze A, Rusetsky A. Sudoviye dvizitely [Marine propulsors], Leningrad, izd. Sudostroenije, 1988.
2. Van Buren T., Floryan D. and Smits A.J. Bio-inspired underwater propulsors, arXiv:1801.09714v2 [physics.flu-dyn] 5 Jul 2018.

3. Pu H., Sun Yi, Yang Y., Ma Sh., and Gong Z. Modeling of the Oscillating-paddling Gait for an ePaddle Locomotion Mechanism, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013
4. Fal'monov E. Kolesny dvizitelno-rulevoy kompleks [Wheel propulsion and steering system], Patent of Russian Federation, RU (11) 2 225 327(13) C2.
5. Gough W.T., Farina S.C., Fish F.E. Aquatic burst locomotion by hydroplaning and paddling in common eiders (*Somateria mollissima*), The Journal of Experimental Biology, 2015, 218, 1632-1638 doi:10.1242/jeb.114140
6. Sahin M., Mohseni K., Colin S.P. The numerical comparison of flow patterns and propulsive performances for the hydromedusae *Sarsia tubulosa* and *Aequorea Victoria*, The journal of experimental biology, 2009, 212, 2656-2667, doi:10.1242/jeb.025536.
7. Chjen P. Otryvniye techeniya [Separation flows], vol. 2, Moscow, izd. Mir, 1972.
8. Kim D. Characteristics of Three-dimensional Vortex Formation and Propulsive Performance in Flapping Locomotion, Ph.D. thesis, California Institute of Technology Pasadena, California, 2010.
9. OpenFOAM <https://www.openfoam.com/>
10. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
11. Menter F. R., Langtry R., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, Springer Science + Business Media B.V. 2006.
12. Devnin S. Aerogidromekhanika plohoobtekeyemih konstrukciy [Aerohydrodynamics of poorly streamlined structures], Leningrad, izd. Sudostroenije, 1983.
13. Idelchik I. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Handbook of hydraulic resistances], Moscow, izd. Mashinostroenye, 1992
14. Goldstein M. Aeroacustica [Aeroacoustics], perevod s anglijskogo, Moscow, izd. Mashinostroenye, 1981

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

Поступила в редакцию: 09.07.2021
Принята к публикации: 15.08.2021

УДК 629.5.07

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.005>

Аналитическое сравнение продольного спуска судна на воду с посадкой на мель

В.И. Осипов¹, e-mail: vladik_moreak@mail.ru¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Аннотация. Регулярно в мире терпит крушение большое количество крупных судов. Количество случаев крушения с каждым годом растет. Крушения происходят, в том числе, из-за значительных размеров судов, роста интенсивности движения на морских путях, роста скоростей движения, неблагоприятных метеорологических условий, недостатков современных навигационных систем. Исходя из этого, следует больше уделять внимание методикам и средствам спасения судна при крушении. В случае крушения судна, для спасения человеческих жизней и груза может быть использована преднамеренная посадка судна на мель. Актуальность исследования вопросов, связанных с преднамеренной посадкой на мель, подтверждается: разработкой новых методов стягивания судна с мели, разработкой в области создания безэкипажных судов, Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты, которая требует от судоводителя: умения осуществлять преднамеренную посадку на мель, понимания основных действий в случае, если посадка на мель неизбежна и действий после посадки на мель. В работе рассматривается продольный спуск судна на воду вперед кормой. Приводится аналитическое доказательство того, что в первом приближении продольный спуск на воду схож с посадкой судна на мель. Приводятся соответствующие математические выкладки. Из приведенного доказательства следует вывод, что в практике судоходства, в аварийной ситуации, можно рассчитать посадку на мель так, что это может привести к спасению судна и как следствие его экипажа и пассажиров.

Ключевые слова: навигационная безопасность плавания, посадка судна на мель, форс-мажорные обстоятельства, живучесть и непотопляемость судна, спасение судна пассажиров и экипажа

Analytical comparison of longitudinal launching of a vessel into the water with grounding

Vladislav I. Osipov¹, e-mail: vladik_moreak@mail.ru¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. A large number of large ships are wrecked on a regular basis in the world. The number of crash cases is growing every year. Wrecks occur, among other things, due to the significant size of ships, the growth of traffic on sea routes, the growth of traffic speeds, unfavorable meteorological conditions, and the shortcomings of modern navigation systems. Based on this, more attention should be paid to methods and means of rescuing a ship in case of a wreck. In the event of a shipwreck, deliberate grounding of the ship may be used to save lives and cargo. The relevance of the study of issues related to deliberate grounding is confirmed by: the development of new methods for pulling a ship aground, development in the field of the creation of unmanned vessels, the International Convention on the Training and Certification of Seafarers and Watchkeeping, which requires the boatmaster to: the ability to carry out deliberate grounding, an understanding of basic actions in the event that a grounding is imminent and of actions after a grounding. The paper considers the longitudinal launching of the vessel into the water forward stern. Analytical proof is given that, in the first approximation, the longitudinal launching is similar to the landing of a ship aground. The corresponding mathematical calculations are given. From the above evidence it follows that in the practice of shipping, in an emergency, it is possible to calculate the aground so that it can lead to the salvation of the vessel and, as a consequence, of its crew and passengers.

Keywords: navigational safety of navigation, ship aground, force majeure, survivability and unsinkability of the ship, salvage of the ship of passengers and crew

Введение

Ежегодно в мире терпит крушение более 200 крупных судов, в результате чего погибает свыше 2 000 человек, теряется более миллиона тонн груза, морская среда загрязняется нефтепродуктами и другими вредными для окружающей среды веществами. Количество случаев крушения судов, опираясь на статистику, с каждым годом растет. Это происходит, в том числе, из-за значительных размеров судов, роста интенсивности движения на морских путях, роста скоростей движения, неблагоприятных метеорологических условий, недостатков современных навигационных систем.

Исходя из этого, следует больше уделять внимания методикам и средствам спасения судна при крушении. В случае крушения судна, для спасения человеческих жизней и груза может быть

использована преднамеренная посадка судна на мель. В работах [5], [6], [8]–[14] рассматриваются случаи посадки судна на мель, в том числе преднамеренной.

Традиционно преднамеренная посадка на мель своего судна может использоваться судоводителем в исключительных аварийных случаях, когда нет другой возможности предотвратить катастрофические нарушения параметров осадки и остойчивости судна вследствие получения им значительных повреждений и поступления воды в большое количество судовых помещений и т. п.

Актуальность исследования вопросов, связанных с преднамеренной посадкой на мель, с каждым годом растет, в том числе из-за того, что процесс стягивания судна с мели заметно модернизировался за последнее время [1], [2]. Кроме того, в настоящее время ведется активная разработка безэкипажных

судов [3], интеграция математического аппарата преднамеренной посадки судна на мель в которые повысила бы живучесть такого типа судов. Наиболее важным является то, что современная редакция Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты требует от судоводителя: умения осуществлять преднамеренную посадку на мель, понимания основных действий в случае, если посадка на мель неизбежна, и действий после посадки на мель [15].

Цель представленной работа заключается в аналитическом сравнении продольного спуска судна на воду вперед кормой с аварийной посадкой судна на мель вперед носом. Изучение посадки судна на мель в таком направлении, может повысить эффективность применения данного метода в практике судоходства, в аварийной ситуации, можно рассчитать посадку на мель так, что это приведет к спасению судна и как следствие к спасению его экипажа и пассажиров. Исходя из поставленной цели, в представленной работе возникает ряд задач:

- рассмотреть продольный спуск на воду;
- проиллюстрировать посадку судна на мель и его спуск на воду;
- проанализировать схожесть основных параметров, описывающих спуск судна на воду с параметрами, описывающими посадку судна на мель;
- получить условие неопрокидывания судна при его посадке на мель.

Продольный спуск на воду

Спуск — это перемещение судна со стапеля на воду. Существует большое количество различных методик спуска судна на воду. В данной работе рассматривается продольный спуск вперед кормой. Продольный спуск судна вперед кормой по сути является обратным во времени процессом по отношению к посадке судна на мель вперед носом.

При исследовании продольного спуска используют прямоугольную систему координат $x y z$, ось oz которой располагают не в плоскости мидельшпангоута, а совмещают с перпендикуляром, проведенным из центра тяжести к линии спусковых дорожек. За неподвижную плоскость принимается порог стапеля.

В первом и втором периодах спуска положение судна в любой момент времени определяется одним параметром — расстоянием a_c от начала координат, измеренным по линии спусковых дорожек. Величину a_c считают положительной, если начало координат не перешло за порог. Положение уровня воды относительно судна определяют отстоянием h_c от начала координат до уровня поверхности воды вдоль оси, проходящей через точку G (см. рис. 1). Параметры a_c и h_c связаны между собой зависимостью

$$h_c = T_0 - a_c \beta_c - c, \quad (1)$$

где T_0 — глубина воды на пороге, β_c — угол наклона спусковых дорожек к горизонту, c — расстояние от дна судна до спусковых дорожек [6].

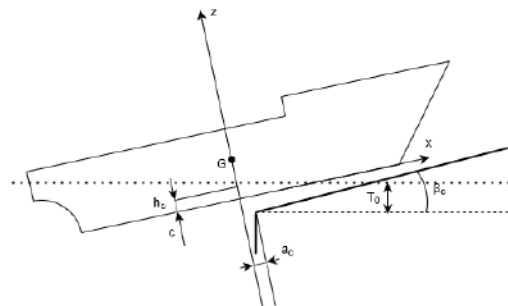


Рис. 1. Схема продольного спуска на воду

Аналитическое сравнение продольного спуска и посадки на мель

Рассмотрим случай, когда с помощью буксировки или толкания осуществляется намеренная посадка судна на мель. В представленной работе рассматривается случай, в котором посадка судна на мель осуществляется вперед носом, т.е. при посадке судна на мель необходимо осуществлять маневрирование так, чтобы судно использовало только продольную остойчивость, которая будет возрастать.

На рис. 2 представлен схематичный пример процесса намеренной посадки судна на мель.

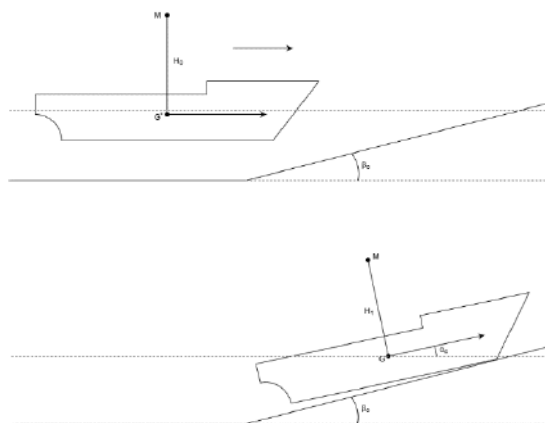


Рис. 2. Посадка судна на мель

На рис. 2 вводятся следующие обозначения: α_c — угол наклона киля по отношению к горизонту (дифферент), β_c — угол наклона морского дна относительно плоскости горизонта. Так как задача сравнения продольного спуска и посадки судна на мель рассматривается в первом приближении и углы α_c и β_c — малы, т.е.

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{a}} \alpha_c(\tilde{x}) = 0, \quad \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{b}} \beta_c(\tilde{x}) = 0,$$

предполагается, что $\alpha_c \approx \beta_c$, кроме этого, $\alpha_c < \beta_c$. Исходя из того, что α_c и β_c — малы, также следует, что

$$\begin{aligned} \sin \alpha_c &\approx \text{tg } \alpha_c \approx \alpha_c, \quad \cos \alpha_c \approx 1, \\ \sin \beta_c &\approx \text{tg } \beta_c \approx \beta_c, \quad \cos \beta_c \approx 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Пусть H_0 — начальная метацентрическая высота (возвышение метацентра над центром тяжести), а δH — изменение первоначальной метацентрической высоты, тогда

$$\delta H = H_1 - H_0 = \frac{-Q}{P-Q} \left(d - \frac{\delta d}{2} - H_0 \right), \quad (3)$$

где H_1 — метацентрическая высота, после посадки судна на мель, d — осадка судна до посадки на мель, P — весовое водоизмещение судна до посадки на мель, δd — потеря средней осадки судна, Q — дополнительная реакция грунта (каменной или иных видов грунта), которая эквивалентна снятию низкорасположенного груза [10]. Величина Q может быть определена выражением

$$Q = \rho \cdot g \cdot S \cdot \delta d, \quad (4)$$

где S — площадь ватерлинии, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность жидкости.

Ускорение свободного падения может быть рассчитано по формуле

$$g = g_0 + 2,225 \cdot 10^{-6} \tilde{h}. \quad (5)$$

В формуле (5) \tilde{h} — глубина в метрах, на которой осуществляется сцепка корпуса судна с грунтом,

$$g_0 = 9,780318 + 0,051628X + 0,000218X^2,$$

где

$$X = \sin^2 \frac{\varphi}{57,29578}$$

зависит от географической широты φ . Также ускорение свободного падения в случае упрощения математической модели может быть положено $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Плотность жидкости может быть рассчитана по формуле Чена — Миллера, [4], которая имеет следующий вид

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{p}{K + Ap + Bp^2}},$$

в которой p — гидростатическое давление в барах, а коэффициенты ρ_0 , K , A и B рассчитываются с учетом температуры воды, солености и некоторых других параметров [4].

В выражении (3) справедливо следующее неравенство

$$d - \frac{\delta d}{2} - H_0 < 0,$$

так как в противном случае величина δH будет отрицательной, что противоречит ее физическому смыслу, следовательно $\delta H > 0$, тогда

$$H_1 = H_0 - \frac{Q}{P-Q} \left(d - \frac{\delta d}{2} - H_0 \right).$$

Рассмотрим подробнее дифферент судна, при посадке на мель (рис. 3). Предположим, что точка G совпадает с ватерлинией, тогда аналогично случаю спуска судна на воду: h_c — осадка судна, а c —

расстояние от дна судна до плоскости морского дна, T_0 — расстояние от ватерлинии до плоскости морского дна.

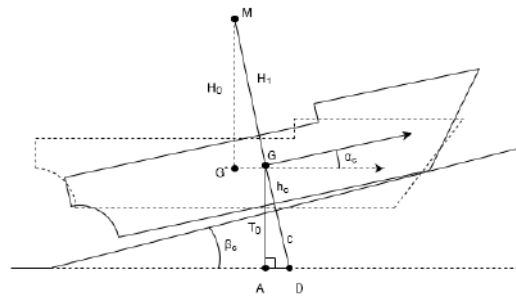


Рис. 3. Дифферент судна при посадке на мель

В результате имеем прямоугольный треугольник ADG (см. рис. 3), в котором $\angle GAD$ — прямой. Рассмотрим подробнее треугольник ADG . Сторона $BD = h_c + c$, а $\angle AGD = \alpha_c$, тогда

$$AD = (h_c + c) \cdot \sin \alpha_c, \quad (6)$$

где, как было отмечено в выражениях (2), в силу того, что $\alpha_c \ll 1$, $\sin \alpha_c \approx \alpha_c$. Тогда выражение (6) принимает вид

$$AD = (h_c + c) \cdot \alpha_c.$$

По теореме Пифагора имеем

$$GD^2 = AG^2 + AD^2. \quad (7)$$

Подставляя в (7) стороны, выраженные через физические обозначения, имеем

$$(h_c + c)^2 = T_0^2 + (h_c + c)^2 \cdot \alpha_c^2,$$

отсюда выражаем сторону $AD = h_c + c$:

$$(h_c + c)^2 (1 - \alpha_c^2) = T_0^2,$$

$$h_c + c = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \alpha_c^2}}. \quad (8)$$

С учетом того, что

$$(1 - \alpha_c^2)^{-\frac{1}{2}} \approx -\frac{1}{2}(-\alpha_c^2) + 1 = \frac{\alpha_c^2}{2} + 1,$$

выражение (8) принимает вид

$$h_c + c = T_0 \left(\frac{\alpha_c^2}{2} + 1 \right),$$

тогда

$$h_c = T_0 \left(1 + \frac{\alpha_c^2}{2} \right) - c.$$

С учетом того, что углы $\alpha_c, \beta_c \ll 1$ допустим замену $\alpha_c^2 = \alpha_c \beta_c$, тогда

$$h_c = T_0 \left(1 + \frac{\alpha_c \beta_c}{2} \right) - c, \quad (9)$$

В результате имеем, что h_c из выражение (9) и h_c из выражения (1) можно считать эквивалентными, они будут приближенно равны с точностью до $\bar{\delta}$.

Исходя из этого можно сделать вывод, что продольный спуск в первом приближении будет схож с посадкой судна на мель.

Исходя из знания значения величины h_c , и знания значения величины осадки судна до посадки на мель d , можно рассчитать значение потери средней осадки судна

$$\delta d = |d - h_c|. \quad (10)$$

Тогда, подставляя правую часть выражения (10) в выражение (3) имеем

$$\delta H = H_1 - H_0 = \frac{-Q}{P-Q} \left(d - \frac{|d - h_c|}{2} - H_0 \right),$$

отсюда, с учетом выражения (4),

$$H_1 - H_0 = \frac{-\rho g S |d - h_c|}{P - \rho g S |d - h_c|} \left(d - \frac{|d - h_c|}{2} \right) + \frac{H_0 \cdot \rho g S |d - h_c|}{P - \rho g S |d - h_c|}. \quad (11)$$

Введем замены $\chi = |d - h_c|$ и $\lambda = \rho g S$. Запишем выражение (11) с учетом этих замен

$$H_1 - H_0 = -\frac{\lambda \chi}{P - \lambda \chi} \left(d - \frac{\chi}{2} \right) + \frac{H_0 \lambda \chi}{P - \lambda \chi}. \quad (12)$$

Отметим, что в выражении (12) знаменатель $P - \lambda \chi \neq 0$. Выполняя преобразования, приведем выражение (12) к квадратному уравнению

$$\frac{\lambda \chi^2}{2} + (\lambda d - H_1 \lambda) \chi + (H_1 - H_0) P = 0, \quad (13)$$

где χ — вещественное число. После решения уравнения (13) относительно χ , из выражения

$$\chi = \left| d - \left(T_0 + \frac{\alpha_c \beta_c}{2} \right) + c \right|. \quad (14)$$

С помощью компьютерного моделирования можно найти зависимость между $\alpha_c \beta_c$ и c в формуле (14). Из показателей данной зависимости можно делать выводы о опрокидывании судна.

Условием отсутствия опрокидывания является неравенство

$$(M'_N)_k > 0, \quad (15)$$

в котором величина M'_N при движении судна во время посадки на мель достигает некоторого минимального значения $(M'_N)_k$ (критического положения). Таким образом, чем выше этот показатель, тем выше вероятность того, что судно останется на плаву.

Глубину безопасного участка дна при посадке судна на мель можно рассчитать из выражения

$$\Gamma_d = d + \delta d.$$

Полученную осадку судна h_c по формуле (9) можно отложить на исправленном масштабе Бонжана и под углом α_c провести исходную ватерлинию, для которой снять площади ω . Аналогичные построения можно выполнить на теоретическом чертеже для определения координат y наклонной ватерлинии.

Параметр ватерлинии посадки на мель Δh_m может быть вычислен аналогично известной формуле расчета параметра ватерлинии всплытия [5]. Если полученная величина Δh_m окажется меньше $0,05 T_{cp}$ — средней осадки посаженного судна на мель, то можно ограничиться первым приближением. При $\Delta h_m > 0,05 T_{cp}$ следует выполнить второе приближение, приняв за исходную осадку параметр h_m .

Ватерлинию посадки на мель можно принять в качестве исходной для критического положения, тогда коэффициент опрокидывания можно рассчитать аналогично коэффициенту опрокидывания при спуске судна на воду [5].

Заключение

В работе был рассмотрен продольный спуск судна на воду вперед кормой. Рассмотрена преднамеренная посадка судна на мель вперед носом. Проведено аналитическое сравнение посадки судна на мель со спуском судна на воду. Рассмотрен продольный спуск на воду. Проиллюстрированы посадка судна на мель и его спуск на воду. Проанализирована схожесть основных параметров, описывающих спуск судна на воду с параметрами, описывающими посадку судна на мель. Получено условие опрокидывания судна при посадке его на мель. Из сравнения продольного спуска с посадкой судна на мель вперед носом следует вывод, что в практике судоходства в аварийной ситуации можно рассчитать посадку на мель так, что это может привести к его спасению и, как следствие спасению экипажа и пассажиров.

Стоит отметить, что в настоящее время идет экспоненциальное развитие цифровых технологий, в том числе в сфере разработки безэкипажных судов, интеграция цифрового аппарата спасения судна при крушении в которые (в частности с помощью аварийной посадки на мель) — крайне важна и необходима.

Литература

1. Азовцев А. И., Кулеш В. А., Огай С. А. Способ стягивания судна с грунта // Патент на изобретение RU 2574870 С1, 10.02.2016. Заявка № 2014141494/11 от 14.10.2014.
2. Азовцев А. И., Кулеш В. А., Огай С. А. Устройство для снятия судна с мели // Патент на полезную модель RU 152813 U1, 20.06.2015. Заявка № 2014141391/11 от 14.10.2014.
3. Алцыбеев Г. О., Федоров Г. В. Применение нейросетевых технологий компьютерного зрения для определения объектов навигационной опасности // Сборник трудов Международной научно-практической конференции к 80-летию со дня рождения профессора А. С. Бутова. 2019. С. 19–24.

4. Алцыбеев Г. О. Расчет солёности морской воды в соответствии с ГСССД 202-2002 // Сборник трудов Международной научно-практической конференции к 80-летию со дня рождения профессора А. С. Бутова. 2019. С. 30–37.
5. Бураковский Е. П., Бураковский П. Е., Дмитровский В. А. К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель // Известия КГТУ. 2013. № 29. С. 159–164.
6. Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
7. Бураковский П. Е. Разработка конструктивной днищевой защиты для снижения последствий от посадок судов на мель // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2014. № 2. С. 14–20.
8. Данилов Ю. А., Гаврильченко Г. Н., Ясюк М. В. Оценка маневренных качеств судна на основе информационно-логического анализа условий аварий посадок судов на мель // В сборнике: БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ. материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. 2019. С. 29–34.
9. Ершов А. А. Безопасная посадка на мель как способ спасения судна при аварии // Бюллетень транспортной информации. 2011. № 9 (195). С. 27–31.
10. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Государственная морская академия имени Адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург, 2012.
11. Ершов А. А. Рекомендации по намеренной посадке на мель, которые могли спасти т/х «Михаил Лермонтов» // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 2 (68). С. 19–23.
12. Ершов А. А. Коротков Б. П., Милькин Г. Т., Овсянников М. С. Теория судна: Статика. СПб.: ГМА им. Макарова. 2009. 170 с.
13. Коршунов В. А., Пономарев Д. А., Родионов А. А., Аунг Куи Мьинт К. М. Исследование динамических характеристик при посадке судна на мель // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2015. № 89-2 (373-2). С. 109–122.
14. Мануковский А. Ю., Макаров Д. А. Определение площади воздействия на дно водоема при посадке и снятии плота с мели // Лесотехнический журнал. 2012. № 4 (8). С. 89–96.
15. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ». 2008. 984 с.

References

1. Azovtsev A. I., Kulesh V. A., Ogay S. A. Sposob styagivaniya sudna s grunta. Patent na izobretenie RU 2574870 C1, 10.02.2016. № 2014141494/11. 14.10.2014.
2. Azovtsev A. I., Kulesh V. A., Ogay S. A. Ustroystvo dlya snyatiya sudna s meli. Patent na poleznuyu model' RU 152813 U1, 20.06.2015. Zayavka № 2014141391/11 ot 14.10.2014.
3. Alcybeev G. O., Fedorov G. V. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy komp'yuternogo zreniya dlya opredeleniya ob"ektov navigatsionnoy opasnosti. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii k 80-letiyu so dnya rozhdeniya professora A. S. Butova. 2019. Pp. 19–24.
4. Alcybeev G. O. Raschet solenosti morskoy vody v sootvetstvii s GSSSD 202-2002. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii k 80-letiyu so dnya rozhdeniya professora A. S. Butova. 2019. Pp. 30–37.
5. Burakovskiy E. P., Burakovskiy P. E., Dmitrovskiy V. A. K voprosu ob otsenke riskov posadki sudna na mel'. Izvestiya KGTU. 2013. No 29. Pp. 159–164.
6. Voytkunskiy Ya. I. Spravochnik po teorii korablya: v trekh tomakh. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov. L.: Sudostroenie, 1985. 440 p.
7. Burakovskiy P. E. Razrabotka konstruktivnoy dnishchevoy zashchity dlya snizheniya posledstviy ot posadok sudov na mel'. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014. No 2. Pp. 14–20.
8. Danilov Yu. A., Gavril'chenko G. N., Yasyuk M. V. Otsenka manevrennykh kachestv sudna na osnove informatsionno-logicheskogo analiza usloviy avari y posadok sudov na mel'. V sbornike: BALTIYSKIY MORSKOY FORUM. materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma: v 6 t. 2019. Pp. 29–34.
9. Ershov A. A. Bezopasnaya posadka na mel' kak sposob spaseniya sudna pri avarii. Byulleten' transportnoy informatsii. 2011. № 9 (195). Pp. 27–31.
10. Ershov A. A. Razrabotka sistemy intellektual'noy podderzhki sudovoditelya dlya snizheniya opasnosti stolknoveniy sudov. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Gosudarstvennaya morskaya akademiya imeni Admirala S.O. Makarova. Sankt-Peterburg, 2012.
11. Ershov A. A. Rekomendatsii po namerennoy posadke na mel', kotorye mogli spasti t/kh «Mikhail Lermontov». Eksploatatsiya morskogo transporta. 2012. No 2 (68). Pp. 19–23.
12. Ershov A. A. Korotkov B. P., Mil'kin G. T., Ovsyannikov M. S. Teoriya sudna: Statika. SPb.: GMA im. Makarova. 2009. 170 p.
13. Korshunov V. A., Ponomarev D. A., Rodionov A. A., Aung Kui M'int K. M. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik pri posadke sudna na mel' // Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova. 2015. № 89-2 (373-2). Pp. 109–122.
14. Manukovskiy A. Yu., Makarov D. A. Opredelenie ploshchadi vozdeystviya na dno vodoema pri posadke i snyatii plota s meli. Lesotekhnicheskij zhurnal. 2012. No 4 (8). Pp. 89–96.
15. Mezhdunarodnaya konventsiya po okhrane chelovecheskoy zhizni na more 1974 goda (tekst, izmenenny Protokolom 1988 goda k ney, s popravkami). SPb.: ZAO «TsNIIMF». 2008. 984 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владислав Игоревич Осипов, аспирант, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, дом 5/7, e-mail: vladik_moreak@mail.ru

Vladislav I. Osipov, graduate student (Eng.), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: vladik_moreak@mail.ru

Поступила в редакцию: 09.07.2021

Принята к публикации: 15.08.2021

УДК 532.526.2.624.124

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.037>

Результаты моделирования зависимости высоты изгибно-гравитационных волн в плавающей пластине с заделанной кромкой от наклонности дна водоема

В.М. Козин¹ e-mail: kozinvictor@rambler.ru¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. На основании проведенных автором экспериментов по разрушению льда амфибийными судами на воздушной подушке (СВП) резонансным методом при их движении в сторону берега, их крупномасштабных моделей в полевых условиях, а также известных случаев разрушения ледяного покрова движущимися в сторону берега транспортными средствами показана возможность существенного увеличения толщины льда, разрушаемого у его береговой кромки. Приведены данные экспериментов, выполненных в опытовом бассейне на моделирующих ледяной покров упругих пленках, подтверждающие эти возможности. В работе представлены результаты моделирования зависимости высоты изгибно-гравитационных волн (ИГВ), возбуждаемых в плавающей пластине движущейся в направлении ее заделанной кромки нагрузкой, от угла наклона дна бассейна. Также приведены рекомендации по использованию наклонности дна для повышения эффективности разрушения ледяного покрова (увеличения толщины разрушаемого льда) путем возбуждения резонансных ИГВ. На основании выполненных экспериментов показано, что приближение к берегу ИГВ, возбуждаемых СВП с последующим их выходом на него, может значительно увеличить толщину разрушаемого льда за счет отрыва от берега его кромки. Отмечена возможность увеличения ледоразрушающей способности ИГВ благодаря последующим проходам судна вдоль нее из-за роста деформаций ослабленного таким образом льда, т.е. повышения ледоразрушающей способности СВП.

Ключевые слова: ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, разрушение, резонанс, наклон дна, моделирование.

Results of modeling the dependence of the height of flexural-gravity waves in a floating plate with a sealed edge on the inclination of the bottom of the reservoir

Viktor M. Kozin¹ e-mail: kozinvictor@rambler.ru¹Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract. Based on the experiments conducted by the author on ice destruction by amphibious hovercraft using the resonant method when they move towards the shore, their large-scale models in the field, as well as known cases of ice cover destruction by vehicles moving towards the shore, the possibility of a significant increase in the thickness of ice destroyed at its coastal edge is shown. The data of experiments performed in the experimental pool on elastic films modeling the ice cover are presented, confirming these possibilities. The paper presents the results of modeling the dependence of the height of Flexural-gravitational waves excited in a floating plate by a load moving in the direction of its embedded edge on the angle of inclination of the pool bottom. Recommendations are also given for using the bottom slope to increase the efficiency of ice cover destruction (increasing the thickness of the destroyed ice) by exciting resonant Flexural-gravitational waves. Based on the performed experiments, it is shown that the approach to the shore of Flexural-gravitational waves excited by hovercraft with their subsequent exit to it can significantly increase the thickness of the destroyed ice due to the separation of its edge from the shore. The possibility of increasing laboratree the ability of the Flexural-gravitational waves during the next passages of the ship along it due to the growth of deformations weakened the ice.

Key words: ice cover, flexural-gravity waves, destruction, resonance, bottom slope, modeling.

Введение

Такие, имеющие важное народнохозяйственное значение ледотехнические проблемы, как: борьба с ледовыми осложнениями в виде заторов и зажоров на реках, текущих с юга на север; продление навигации на внутренних водных путях; раннее вскрытие ото льда водохранилищ на нижнем бьефе гидроэлектростанций с целью повышения выработки их электроэнергии; поведение и разрушение ледяного покрова от действия динамических нагрузок и пр., как показывают исследования, могут быть успешно решены с помощью сравнительно недавно обнаруженной способностью разрушать ледяной покров СВП резонансным методом, т.е. путем возбуждения во льду резонансных ИГВ [1]. Относительно подробный обзор работ по распространению в ледяном покрове ИГВ,

возбуждаемых динамическими нагрузками с целью решения вышеперечисленных задач, приведен в работе [2]. В работе [3] показана возможность повышения эффективности разрушения ледяного покрова резонансным методом (РМРЛ) за счет использования такого ледового условия, как близость берега к месту выполнения ледокольных работ. Это объяснялось тем, что при движении СВП вдоль берега из-за роста высоты возбуждаемых ИГВ увеличивалась толщина разрушаемого льда у его береговой кромки. Снижение вследствие этого несущей способности ледяного покрова позволяло за счет последующих проходов СВП вдоль нее разрушить более толстый по сравнению с бесконечным полем лед. Однако, как показали выполненные впоследствии соответствующие дополнительные эксперименты, это увеличение, т.е. повышение эффективности разрушения льда по

сравнению с его разрушением вдали от берега, оказалось не столь значительным. Как выяснилось, в большей степени увеличить толщину льда, разрушаемого РМРЛ, т.е. снизить энергозатраты на его разрушение по сравнению с его реализацией в условиях бесконечного ледяного поля, можно за счет движения судна в сторону берега с последующим выходом на него (конечно, при условии отсутствия риска повредить гибкое ограждение судна). Таким образом, данная работа является своеобразным продолжением ранее выполненных исследований.

1. Сведения о разрушении ледяного покрова движущимися нагрузками при их выходе на берег

Известно [4,5], что при приближении гравитационных волн к берегу, т.е. переходу с глубокой воды на мелководье, происходит трансформация их параметров: длина волн уменьшается, а высота – растет. Крутизна волн при этом достигает предельной величины у берега, где возникают опрокидывание ее гребня и прибой, т.е. происходит своеобразная концентрация ее энергии.

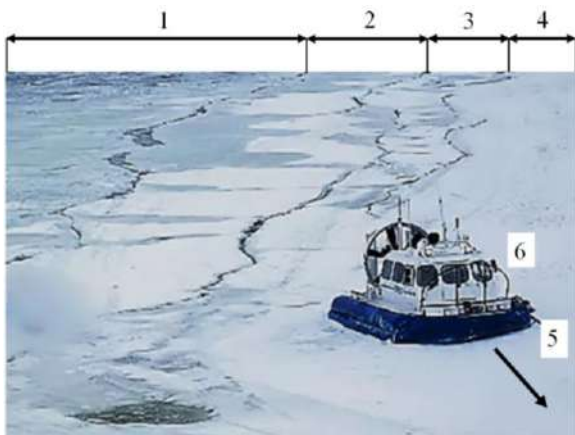


Рис. 1. Уменьшение размеров обломков льда 2,3 в направлении 5 движения судна 6 при его сходе со сплошного льда 1, приближении к берегу 4 и выходе на него [7]

Также известно [6], что при движении по ледяному покрову какой-либо нагрузки в последнем возникают ИГВ, представляющие комбинацию изгибных и гравитационных волн. При этом, как отмечается в этой же работе, некоторые параметры возбуждаемых ИГВ в условиях ограниченной глубины не зависят от физико-механических характеристик льда. На основании этого можно сделать заключение, что природа возникновения и закономерности распространения гравитационных и ИГВ близки друг к другу, что подтверждается рис. 1.

Из этого следует, что распространяющиеся в сплошном льду на глубокой воде ИГВ при выходе на мелководье могут привести к разрушению более толстого льда, т.к. в этом случае они приобретают своеобразную дополнительную ледоразрушающую способность. Подтверждением этому могут служить следующие зафиксированные случаи разрушения ледяного покрова у берега при приближении к нему ИГВ, распространяющимися вслед за движущимися

нагрузками, хотя вдали от берега разрушения льда не происходило. Так, во время проведения испытаний СВП «Гепард» и крупномасштабной модели СВП на реке Амур (1984–1987гг.) [2] было обнаружено, что в случаях, когда ледяной покров не удавалось разрушить при движении судов с резонансной скоростью (вес судна и давление в его воздушной подушке были недостаточными для разрушения льда данной толщины), то удавалось разрушить его береговую кромку при движении судов в сторону береговой линии с последующим выходом их на берег (рис. 2,3 автора).



Рис. 2. Разрушение ледяного покрова СВП «Гепард» при его выходе на берег



Рис. 3. Разрушение ледяного покрова крупно масштабной моделью СВП при ее выходе на берег

Это можно объяснить не только изменением параметров ИГВ при их выходе на ярко выраженное мелководье (где еще могут распространяться ИГВ) с наклонным дном водоема (в этих условиях происходит аналогичная с гравитационными трансформация их параметров: уменьшение длины с одновременным ростом высоты ИГВ, т.е. увеличение кривизны их профиля, а значит, и изгибных напряжений во льду), но и с их взаимодействием с отраженными от берега волнами, т.е. за счет создания своеобразного гидроудара при их интерференции (рис. 4). После чего полоса разрушенного вдоль берега ледяного покрова расширялась за счёт последующих проходов СВП вдоль неё с резонансной скоростью, т.к. наличие свободной кромки значительно уменьшало несущую способность ледяного покрова. В результате удавалось разрушить более толстый лед, т.е. увеличить ледоразрушающую способность возбуждаемых ИГВ.



Рис. 4. За судном виден выбитый гидроударом лед [7]

Аналогичные случаи разрушения ледяного покрова наблюдались при приближении или выходе на берег самолетов (рис. 5,6) и при попытке автомобилей выйти на него (рис. 7), хотя толщина льда у берега, как правило, больше, чем вдали от него..

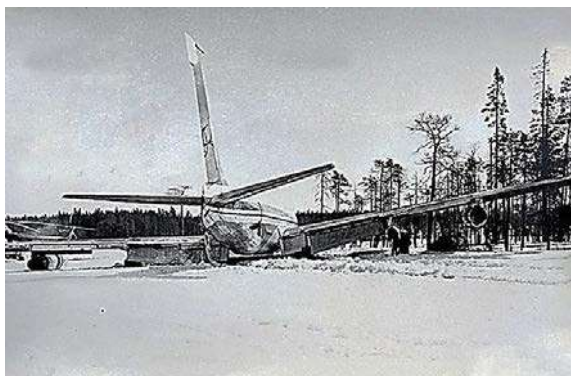


Рис. 5. Катастрофа с Boeing 707 в Карелии при приближении самолета к берегу [8]

Подобные случаи разрушения льда явились основанием для продолжения модельных экспериментов, изложенных в работе [3]. Цель этих исследований заключалась в поиске дополнительных возможностей повышения эффективности РМРЛ за счёт использования подобных ледовых условий и маневрирования судов.



Рис. 6. Разрушение ледяного покрова при рулежке самолета с выходом на берег [8]



Рис. 7. Разрушение ледяного покрова при движении автомобилей в сторону берега и попытке выйти на него [9]

2. Результаты экспериментальных исследований

Модельные эксперименты проводились в опытовом бассейне Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета в соответствии с методикой, описанной в ранее выполненной работе [3]. Исследования проводились при различных углах наклона дна β (10° , 20° , 30°) и при глубине $H=0.06$ м.

Наклонность дна и условия экспериментов моделировались по схеме, представленной на рис. 8 (где S – длина наклонного участка дна). Для $\beta = 30^\circ$ S составляла 0,30 м; для 20° – 0,44 м; для 10° – 0,86 м.

В процессе проведения экспериментов были получены зависимости относительной высоты ИГВ \bar{A} (где, $\bar{A} = A\beta/A_{\max}$; $A\beta$ – высота волны при соответствующих углах наклона дна β с выходом нагрузки на берег; A_{\max} – максимальная высота волны вдали от берега) от относительной скорости нагрузки χ (где: $\chi = u / \sqrt{gH}$; u – скорость нагрузки; g – ускорение силы тяжести; H – глубина воды на участке с горизонтальным дном) при различных углах наклона дна (рис.9).

Как видно из графиков, наиболее эффективным оказалось движение нагрузки с низкими скоростями и, как следовало ожидать, в сторону более крутого берега. С ростом скорости нагрузки высота ИГВ начинала уменьшаться. К аналогичному результату приводило и уменьшение наклонности дна.

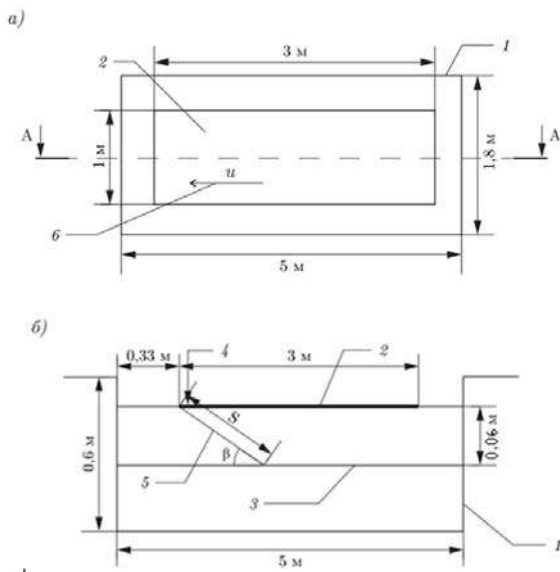


Рис. 8. Схема установки: а) – вид сверху, б) – сечение по А–А: 1 – чаша бассейна; 2 – модельный лёд; 3 – подвесное дно; 4 – место установки датчика; 5 – наклонное дно; 6 – направление движения нагрузки

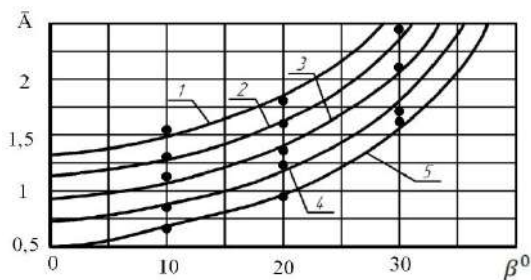


Рис.9. Зависимость относительной высоты ИГВ от углов наклона дна и скорости нагрузки: 1- $\chi=0,2$; 2- $\chi=0,3$; 3- $\chi=0,4$; 4- $\chi=0,5$; 5- $\chi=0,6$

3. Рекомендуемые способы использования наклонности дна водоёма и маневрирования СВП

В тех случаях, когда имеющееся СВП не способно разрушить ледяной покров заданной толщины при его движении с резонансной скоростью в условиях глубокой воды, следует найти участок акватории с крутым (наибольшим наклоном дна), но одновременно безопасным с точки зрения повреждаемости гибкого ограждения судна при выходе СВП со льда берегом. Затем на резонансных скоростях [2] сделать несколько проходов СВП вдоль берега в непосредственной от него близости. Если разрушения кромки льда не произойдет, то проходы следует повторить, совершая круговые движения (циркуляцию) опять же вблизи береговой линии. Если и это не приведет к разрушению льда, то судно следует перемещать под прямым углом к береговой линии с последующим выходом на берег, что, как было показано выше, повысит вероятность отрыва льда от берега. После разрушения береговой кромки движение судна продолжают вдоль нее с резонансной для соответствующих этим глубинам скоростью. В результате за счет использования такого маневрирования вследствие уменьшения несущей способности ледяного покрова, благодаря

появившейся свободной кромке, будет разрушен более толстый лед, т.е. повышена эффективность РМРЛ.

Дополнительное увеличение ледоразрушающей способности ИГВ, возбуждаемых СВП при выходе судна на берег, можно обеспечить следующим образом. Если параметры судна не позволяют разрушить ледяной покров резонансным методом в данных ледовых условиях и при описанном выше маневрировании, то ожидают время наступления максимального подъема уровня воды (или прилива). В результате ледяной покров, примерзший к берегу, начнет испытывать наибольшие изгибные деформации у его береговой кромки, т.е. в месте своеобразной жесткой заделки (иногда в морских условиях они являются причиной отрыва берегового припая от берега). Для их использования при разрушении льда резонансными ИГВ СВП при достижении максимального уровня воды следует перемещать перпендикулярно кромке береговой линии. Первая вершина ИГВ, движущаяся впереди судна и вызывающая изгибные деформации того же знака, что и подъем воды, увеличит суммарные изгибные напряжения во льду у берега, что при достаточных параметрах СВП облегчит процесс разрушения кромки ледяного покрова. При этом, если позволяет береговой рельеф, СВП следует выводить на берег. Если берег крутой, то для предотвращения столкновения с ним СВП перемещают под углом к береговой линии (рис. 2). После возбуждения ИГВ максимальной амплитуды при движении СВП с резонансной скоростью, которую можно определить разработанными автором способами [2], судно разворачивают или тормозят вблизи берега. Возбужденные же ИГВ, благодаря накопленной кинетической энергии, по инерции будут продолжать распространяться и достигнут береговую линию, что за счет гидроудара (рис. 4) позволит с меньшими энергозатратами оторвать ее от берега. Возникновение у льда свободной кромки уменьшит его несущую способность. В результате этого последующие проходы СВП вдоль нее с резонансной скоростью приведут к возбуждению ИГВ с возрастающей амплитудой, что увеличит ледоразрушающую способность судна, т.е. толщину разрушаемого льда [10].

Известно, что наличие и возрастание угла дифферента СВП приводит к увеличению его сопротивления, т.е. его волновой составляющей [11]. Возрастание амплитуды ИГВ, возбуждаемых СВП, и, соответственно, их ледоразрушающей способности при наличии у судна дифферента отмечалось и в экспериментальных исследованиях [2]. Очевидно, что аналогичные явления будут происходить при возникновении у СВП крена и его движении бортом при циркуляции. Таким образом, движение СВП по синусоидальной траектории с креном приведет к возбуждению дополнительной системы ИГВ, которая, накладываясь на систему ИГВ от поступательного движения судна, увеличит суммарную амплитуду ИГВ, т.е. их ледоразрушающую способность. Для использования этой закономерности в тех случаях, когда судно не способно разрушить ледяной покров и не может выйти на берег для

разрушения его кромки, то одновременно с поступательной скоростью вдоль береговой кромки, равной резонансной, судно перемещают по синусоидальной траектории, сохраняя при этом неизменной резонансную скорость в направлении его поступательного движения и обеспечивая при помощи, например, балластных цистерн крен в сторону центра кривизны ее траектории движения. Это повысит интенсивность и, соответственно, ледоразрушающую способность возбуждаемых ИГВ [12].

Заключение

Исследования влияния ледовых условий и режимов маневрирования СВП на эффективность РМРЛ, выполненные на натуральных СВП, их крупномасштабных моделях в полевых ледовых условиях и в опытовом бассейне, показали наличие возможностей для разработки технологий существенного увеличения эффективности начавшегося использоваться РМРЛ за счет соответствующего использования мелководья, переменности глубины (угла наклона дна бассейна)

и соответствующего маневрирования СВП. Так, в рассмотренном диапазоне изменения углов наклона дна вблизи берега деформации, а значит, и изгибные напряжения, значительно возрастали. Это подтверждает практическую значимость полученных результатов и указывает на перспективность дальнейших более детальных исследований в этом направлении. Получены зависимости, позволяющие оценить возможности увеличения ледоразрушающей способности СВП за счет использования рельефа дна, в том числе, и использования амфибийности, т.е. способности выхода СВП на берег. Предложенные автором способы по использованию энергии естественного деформирования льда и поведения судна на циркуляции могут быть полезными при разработке более эффективных решений вышеперечисленных в работе ледотехнических задач.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Литература

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное - СПб.: Судостроение, 2013, - 504 с., ил. ISBN 5-73355-0779-6
2. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ. 2013, 250 с. ISBN 978-5-85097-519-0
3. Козин В.М. Возможности повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования близости берега к месту выполнения ледокольных работ // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 2, том. 1. С.41 – 46.
4. EurOtop, 2007. 'EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual', Environment Agency, UK/ENW Expertise Network Waterkeren, NL/KFKI Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, Pullen T., Allsop N.W.H., Bruce T., Kortenhaus A., Schüttrumpf H. and van der Meer J. W. <http://www.overtopping-manual.com>
5. Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C. and Narayanan R. Hydraulic structures. Spon Press, London and New York, 2001. – 666 p.
6. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоздат. 1967. – 216
7.
9. [51](https://www.google.com/search?q=%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE+%D0%BD%D0%B0+%D0%BB%D1%8C%D0%B4%D1%83&rlz=1C1ASUM_enRU894RU894&oeq=%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE+%D0%BD%D0%B0+%D0%BB%D1%8C%D0%B4%D1%83&aqs=chrome..69i57.52404j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8(дата обращения 24.06.2020).
10. Патент 2203826 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // В63В 35/08. Опул.: 10.05.2003 Бюл. № 13.
11. Бенуа Ю.Ю. и др. Основы теории судов на воздушной подушке. Л: Судостроение, 1970. 247 с.
12. Патент 2507104 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Погорелова А.В. // В63В 35/08. Опул.: 20.02.2014 Бюл. № 5.

</div>
<div data-bbox=)

References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya khodkost sudov. 2 izdanie, ispravlennoe - SPb.: Sudostroenie [St. Petersburg: Shipbuilding], 2013, - 504 s., il. ISBN 5-73355-0779-6
2. Kozin V.M., Zemlyak V.L. Fizicheskie osnovy razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym metodom. Komsomolsk-na Amure: IMIM DVO RAN, PGU im. Sholom-Aleikhema, AmGPGU. 2013, 250 s. ISBN 978-5-85097-519-0
3. Kozin V.M. Vozможности povыsheniya effektivnosti rezonansnogo metoda razrusheniya ledyanogo pokrova za schet ispolzovaniya blizosti berega k mestu vypolneniya ledokolnykh rabot // Morskie intellektualnye tekhnologii [Marine intelligent technologies], 2020. № 2, tom. 1. S.41 – 46.
4. EurOtop, 2007. 'EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual', Environment Agency, UK/ENW Expertise Netwerk Waterkeren, NL/KFKI Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, Pullen T., Allsop N.W.H., Bruce T., Kortenhaus A., Schüttrumpf H. and van der Meer J. W. <http://www.overtopping-manual.com>
5. Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C. and Narayanan R. Hydraulic structures. Spon Press, London and New York, 2001. □ 666 p.
6. Kheisin D.E. Dinamika ledyanogo pokrova. L.:Gidrometeoizdat. 1967. – 216 s.
7.
9. [### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS](https://www.google.com/search?q=%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE+%D0%BD%D0%B0+%D0%BB%D1%8C%D0%B4%D1%83&rlz=1C1ASUM_enRU894RU894&oq=%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE+%D0%BD%D0%B0+%D0%BB%D1%8C%D0%B4%D1%83&aqs=chrome..69i57.52404j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (data obrashcheniya 24.06.2020).
10. Patent 2203826 RF. Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova / Kozin V.M. // V63V 35/08. Opubl.: 10.05.2003 Byul. № 13.
11. Benua Yu.Yu. i dr. Osnovy teorii sudov na vozduzhnoi podushke. L.: Sudostroenie [[St. Petersburg: Shipbuilding], 1970. 247 s.
12. Patent 2507104 RF. Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova / Kozin V.M., Zemlyak V.L., Pogorelova A.V. // V63V 35/08. Opubl.: 20.02.2014 Byul. № 5.

</div>
<div data-bbox=)

Виктор Михайлович Козин, доктор технических наук, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallurgov 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Viktor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Shipbuilding Department, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgov st., e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Поступила в редакцию: 29.06.2021
Принята к публикации: 15.08.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.12.001.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.006>**Постановка и решение задачи проектирования рамного набора поперечной водонепроницаемой переборки крупнотоннажного контейнеровоза с использованием оптимизационно - поисковых процедур и нормативных требований правил DNV-GL**В.Н. Тряскин¹ e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru, Юй Синьянь¹ e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Поперечные переборки крупнотоннажных контейнерных судов представляют собой сложные конструкции, при проектировании которых обычно используется методология проверочного расчета на основе метода конечных элементов (МКЭ). Для создания конечно-элементной модели необходимо знать размеры всех элементов конструкций, входящих в состав переборки. Поэтому такой подход к проектированию является итерационным, что обуславливает высокую трудоемкость процесса проектирования. На ранних стадиях проектирования размеры конструкций поперечных переборок контейнеровоза могут быть быстро и достаточно точно оценены на основе аппарата нелинейного программирования, относительно простой модели составной (конструктивно-ортотропной) пластины и нормативных требований Правил классификационных обществ. Такой подход применяется в Российской практике при проектировании двойных конструкций типа двойное дно или понтон плавучего дока.

В статье предложено решение задачи проектирования рамного набора поперечной переборки крупнотоннажного контейнеровоза на нагрузки от контейнеров, действующие на переборку при качке судна. Конструкция переборки приводится к условной модели «коффердамного» типа. Затем используется методика приведения составной «конструктивно-ортотропной» пластины к изотропной пластине с несколько иным соотношением сторон, но с такими же параметрами изгиба. Это позволяет применить существующие табличные данные для определения расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил, которые после аппроксимации представляются в виде полиномов – аналитических зависимостей. Показана постановка оптимизационно-поисковой задачи математического программирования. Целевая функция – характеристика массы рамного набора. Ограничения задачи формируются на основе нормативных требований DNV-GL и математических зависимостей модели составной пластины. Для решения задачи используется инструмент MS Excel «Поиск решения». Представлены результаты тестового проектного расчета применительно к конструкции крупнотоннажного контейнеровоза с контейнерной вместимостью 18 тыс. TEU. Сопоставление результатов проектирования с оригинальными расчетами фирмы – проектанта показали удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: крупнотоннажный контейнеровоз, поперечные переборки, проектирование конструкций переборки.

Statement and solution the problem of designing of water-tight bulkheads web frames for large container vessels by using DNV-GL rules requirements and optimization techniquesVladimir N. Tryaskin¹ e-mail: tryaskin.vn @ yandex.ru, Yu Xinyan¹ e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru¹Saint-Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The transverse bulkheads of the large container vessels are complex structures that are commonly designed using the finite element method (FEM) verification methodology. To create a finite element model, it is necessary to know the dimensions of all structural elements of the bulkhead. Therefore, this approach to design is iterative, which leads to a high complexity of the design process. At the early stages of design, the dimensions of the structures of the transverse bulkheads of a container vessel can be quickly and accurately estimated based on the nonlinear programming technique, a relatively simple model of a composite (structural-orthotropic) plate, and the regulatory requirements of the Rules of Classification Societies. This approach is used in practice in Russia when designing double structures such as a double bottom or pontoon of a floating dock.

The article proposes a solution to the problem of the transverse bulkhead web frames designing in application to a large-tonnage container vessel for loads of containers acting on the bulkhead when the vessel is moving on the waves. The bulkhead structure is reduced to the conditional "cofferdam" type model. The technique is used to reduce a composite "structurally-orthotropic" plate to an isotropic one with a slightly different aspect ratio, but with the same bending parameters. This allows applying the existing tabular data to determine the design bending moments and shear forces, which, after approximation, are represented as polynomial analytical dependencies. The statement the optimization-search problem of mathematical programming is shown. The goal function is the characteristic of the bulkhead's webs mass. The constraints of the problem are formed on the DNV-GL regulatory requirements and mathematical relationships of the composite plate model. MS Excel tool "Solver" is used to solve the problem. The results of a test calculation are presented as applied to a large-capacity container ship with container capacity of 18000 TEU. Comparison of the design results with the original calculations of the designer's company showed satisfactory agreement.

Key words: large-capacity container vessel, transverse watertight bulkheads, design of bulkhead structures.

Введение

Поперечные переборки крупнотоннажного контейнерного судна (см. рис. 1) представляют собой сложные конструкции, состоящие из большого количества вертикальных рамных стоек, устанавливаемых в плоскости каждого днищевго стрингера и нескольких горизонтальных диафрагм-шельфов, расположенных в плоскости горизонтальных диафрагм двойного борта. Переборки могут быть как «коффердамного» типа - с двумя водонепроницаемыми обшивками, так и с одной водонепроницаемой обшивкой. При обоих конструктивных вариантах в верхней части переборки предусматривается коффердамная конструкция опорного моста, площадь которой достигает 20-25% общей площади поперечной переборки. Водонепроницаемые обшивки подкрепляются горизонтальными или вертикальными балками основного набора.

Проектирование обшивки и балок основного набора легко реализуется прямым расчетом по соответствующим требованиям Правил DNV-GL [1]. Решение таких задач показаны в статье [2]. Проектирование рамного набора переборки является задачей более высокого иерархического уровня. При

этом толщина водонепроницаемой обшивки и размеры балок основного набора являются известными и в процессе проектирования рамных балок не изменяются.

Для проектирования рамного набора поперечных переборок контейнеровозов предлагается использовать аппарат математического программирования. При определении значений целевой функции и ограничений задачи в итерационных циклах оптимизационно-поисковой процедуры могут использоваться математические зависимости приближенного метода приведения рассматриваемой задачи к задаче расчета составных (конструктивно-ортотропных) пластин. Возможность применения такого подхода для проектирования рамного набора конструкций типа двойного дна показана в работе [3]. Модель составной пластины использовалась при разработке требований к понтону плавучих доков [4,5]. В настоящей статье обосновывается возможность применения аналогичного подхода для проектирования рамных стоек и шельфов переборок с одинарной водонепроницаемой обшивкой и опорным мостом коффердамного типа.

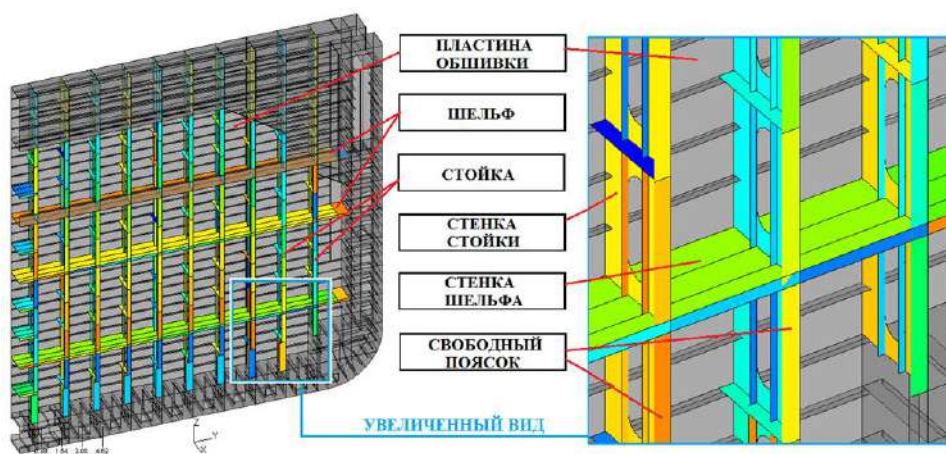


Рис.1 Конструкция переборки крупнотоннажного контейнеровоза (показана половина переборки, симметричная относительно ДП), крупным планом показаны рамные балки

1. Постановка, алгоритм и расчетные зависимости решения задачи проектирования рамного набора с использованием теории изгиба составных пластин

Для решения задачи предложен следующий алгоритм:

1. При заданной конструктивной схеме переборки, на основе требований Правил DnV-GL для случая аварийного затопления отсека определяется толщина водонепроницаемой обшивки и размеры балок основного набора.

2. Выполняется постановка задачи математического программирования общего вида:

принимая в качестве вектора варьируемых конструктивных параметров:

$$\mathbf{X} = [x_{ij}]^T, i = 1, 2; j = 1, \dots, 5, \quad (1)$$

где индекс $i = 1$ - определяет блок параметров для шельфа, а $i = 2$ - определяет аналогичный блок параметров для рамной стойки; $j = 1$ - высота

стенки; $j = 2$ - толщина стенки; $j = 3$ - ширина свободного пояса; $j = 4$ - толщина свободного пояса; $j = 5$ - предел текучести материала балки,

минимизировать массу рамного набора переборки, определяемую функцией цели следующего вида:

$$GF(\mathbf{X}) = \sum_i \{ (x_{i1}x_{i2} + x_{i3}x_{i4}) N_i l_i \}, i = 1, 2 \quad (2)$$

где N_i и l_i - количество и пролет рамных балок i -го типа,

при наличии:

m ограничений - равенств

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, \dots, m,$$

n ограничений - неравенств

$$g_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, \dots, n,$$

и граничных условий

$$x_{ij}(\min) \leq x_{ij} \leq x_{ij}(\max) i = 1, 2; j = 1, \dots, 5 \quad (3)$$

Ограничения – равенства включаются в задачу в зависимости от её постановки, когда нужно

зафиксировать значение одного или нескольких параметров, например: предел текучести материала или высоту рамной балки.

Ограничения – неравенства формируются на основе требований Правил DnV-Gl: условий прочности балки на изгиб или сдвиг, соотношений между высотой и толщиной стенки профиля, шириной и толщиной свободного пояса.

Граничные условия определяют область допустимых значений варьируемых параметров и могут назначаться на основе данных прототипа, других не формализуемых условий.

3. Для расчета значений целевой функции и ограничений задачи используются зависимости от варьируемых параметров, определяющие следующие характеристики:

- моменты инерции поперечного сечения и отстояния от нейтральной оси верхнего и нижнего поясков горизонтальных $I_1(\mathbf{X})$, $z_{1в}(\mathbf{X})$, $z_{1н}(\mathbf{X})$ и вертикальных $I_2(\mathbf{X})$, $z_{2в}(\mathbf{X})$, $z_{2н}(\mathbf{X})$ рамных балок переборки;

- цилиндрические жесткости условной конструктивно-ортотропной составной пластины:

$$D_1(\mathbf{X}) = \frac{EI_1(\mathbf{X})}{1-\mu^2}, \quad (4)$$

$$D_2(\mathbf{X}) = \frac{EI_2(\mathbf{X})}{1-\mu^2} \quad (5)$$

$$D_3(\mathbf{X}) = \frac{E}{1-\mu^2} \frac{t_B(\mathbf{X}) t_H(\mathbf{X})}{t_B(\mathbf{X}) + t_H(\mathbf{X})} x_{11}^2 \quad (6)$$

где $x_{11} = x_{21} = h$ - высота рамных балок; одинаковая высота шельфов и рамных стоек регламентируется ограничением - равенством $h_1(\mathbf{X}) = x_{11} - x_{21} = 0$.

- параметры относительной жесткости пластины во взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\gamma_1 = \frac{a^4}{b} \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}, \quad \gamma_2 = \frac{a^4}{b} \sqrt{\frac{D_2}{D_3}} \quad (7)$$

где $\frac{a}{b}$ - соотношение сторон составной пластины.

В соответствии с выводом, обоснованном в [3], если $D_3 = \sqrt{D_1 D_2}$, то упругая поверхность составной пластины будет соответствовать упругой поверхности изотропной пластины, отношение

сторон которой $\gamma = \frac{a^4}{b} \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}$. Следовательно, если

жесткости D_1 , D_2 и D_3 составной пластины будут удовлетворять условию $D_3 = \sqrt{D_1 D_2}$, то ее элементы изгиба могут быть точно определены при помощи таблиц изгиба изотропных пластин. Если это условие не выполняется, то для приближенного решения задачи можно выбрать некоторое расчетное соотношение сторон γ изотропной пластины, при помощи которого элементы изгиба рассматриваемой составной (ортотропной) пластины определялись бы с наименьшей ошибкой.

4. Используя метод А.А. Курдюмова [3, с. 151], находится приближенное соотношение сторон изотропной пластины γ , при помощи которого элементы изгиба рассматриваемой составной (ортотропной) пластины определялись бы с наименьшей ошибкой. При этом граничные условия изотропной и составной пластин должны быть

одинаковые. Для пластины, жестко заделанной по трем кромкам и со свободной четвертой кромкой, значение γ определяется по формуле¹:

$$\gamma = \left(\frac{(16\gamma_1^4 \gamma_2^2 + (9\gamma_1^4 \gamma_2^4 + 32\gamma_1^8 \gamma_2^2 (3 + 8\gamma_2^2)))^{0.5}}{32\gamma_1^4 + 3\gamma_2^2} \right)^{0.5} \quad (8)$$

Это решение для пластины, жестко заделанной по трем кромкам и со свободной четвертой, которое получено из условия [2, с. 151]:

$$\iint_0^1 \left[\left(\frac{1}{\gamma^4} - \frac{1}{\gamma_1^4} \right) \frac{\partial^4 w_1}{\partial \xi^4} + 2 \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_2^2} \right) \frac{\partial^4 w_1}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} \right] w_1 d\xi d\eta = 0 \quad (9)$$

В этом равенстве w_1 – первый член разложения упругой поверхности изотропной пластины в тригонометрический ряд по функциям, удовлетворяющим всем граничным условиям. Для пластины жестко заделанной по трем кромкам и свободной по четвертой (см. рис. 2)

$$w_1 = f_1 \left(1 - \cos \frac{\pi}{2} \xi \right) (1 - \cos 2\pi \eta); \quad f_1 = 0.5 \quad (10)$$

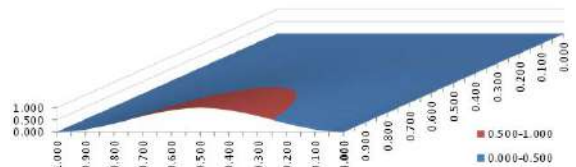


Рис. 2 Форма упругой поверхности изотропной пластины жестко заделанной по трем кромкам и свободной по четвертой

5. Используя табличные данные, приведенные, например, в справочнике [6, с.19] определяем коэффициенты $k_i(\gamma(\mathbf{X}))$, позволяющие определить нормальные и касательные напряжения в заданных «горячих» точках составной пластины. Для использования значений этих коэффициентов в итерационных циклах поисковых процедур, средствами MS Excel получены аппроксимирующие зависимости вида $k_i(\gamma) = \sum_{j=0}^{j_{max}} (b_{ij} \gamma^j)$;

максимальная степень полинома, j_{max} может быть различной для разных коэффициентов. Например, при $i = 3, 4, 6, 7$, зависимости $k_i(\gamma)$ имеют вид:

$$\begin{cases} k_3 = -0.0278\gamma^3 + 0.0164\gamma^2 + 0.0467\gamma - 0.0188 \\ k_4 = 0.0112\gamma^3 - 0.0563\gamma^2 + 0.1004\gamma - 0.0246 \\ k_6 = -0.2407\gamma^4 + 1.3224\gamma^3 - 2.6894\gamma^2 + 2.4644 \\ k_7 = -0.0123\gamma^3 + 0.0752\gamma^2 - 0.1565\gamma + 0.0274 \end{cases} \quad (11)$$

6. Поскольку в таблицах справочника нет рекомендаций по определению коэффициентов перерезывающей силы для опорных сечений изотропной пластины, жестко заделанной по трем кромкам и свободной по четвертой, значения этих коэффициентов оценивались исходя из следующих допущений:

- коэффициент перерезывающей силы в середине опорной кромки в плоскости внутренних бортов n_1 может быть приближенно принят равным

¹ Решение для пластины, жестко заделанной по трем кромкам и со свободной четвертой, получено впервые.

соответствующему коэффициенту для пластины с таким же соотношением сторон, но жестко заделанной по контуру; такие данные приведены в справочнике [6]: $n_1 \cong 0.5$;

- учитывая, что рассматриваемая пластина существенно вытянута в поперечном направлении ($b/a = 1.811$), а нагрузка на неё – равномерно распределенная, можно предположить, что в средней части изгиб пластины близок к цилиндрическому и перерезывающая сила может быть принята приблизительно равной перерезывающей силе в опорном сечении (на уровне второго дна) жестко заделанной однопролетной консольной балки-полоски, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой $\tilde{N}_2 = \tilde{n}_2 p b$, где коэффициент перерезывающей силы $\tilde{n}_2 \cong 1.0$, p – расчетное давление; a – пролет балки-полоски.

7. Наличие зависимостей для определения коэффициентов расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил, а также нормативов Правил DnV-GL позволяет сформировать ограничения - неравенства поисковой задачи.

Условия местной прочности рамных стоек ($g \equiv girders$) и шельфов ($s \equiv stringers$) приводят к четырем ограничениям-неравенствам:

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{X}) = W_{g_act}(\mathbf{X}) - W_{g_req}(\mathbf{X}) \geq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) = f_{w_g_act}(\mathbf{X}) - f_{w_g_req}(\mathbf{X}) \geq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) = W_{s_act}(\mathbf{X}) - W_{s_req}(\mathbf{X}) \geq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) = f_{w_s_act}(\mathbf{X}) - f_{w_s_req}(\mathbf{X}) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

где $W_{g_act}(\mathbf{X})$, $W_{s_act}(\mathbf{X})$ - текущее фактическое значение минимального момента сопротивления поперечного сечения рамных стоек и шельфов, соответственно; $W_{g_req}(\mathbf{X})$, $W_{s_req}(\mathbf{X})$ требуемые Правилами DnV-GL значения; $f_{w_g_act}(\mathbf{X})$, $f_{w_s_act}(\mathbf{X})$ - текущее фактическое значение площади сечения стенки рамных стоек и шельфов, соответственно; $f_{w_g_req}(\mathbf{X})$, $f_{w_s_req}(\mathbf{X})$ - требуемые Правилами DnV-GL значения площади сечения стенки.

Требования к соотношению параметров стенки и пояска дают еще шесть ограничений:

$$\begin{cases} g_5(X) = (x_{12} + t_k) - a_{1_stiff} / (60\sqrt{k(x_{15})}) \geq 0 \\ g_6(X) = (x_{22} + t_k) - a_{2_stiff} / (60\sqrt{k(x_{25})}) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

если $P_Type = 1$

$$g_{6+i}(X) = 400/\sqrt{x_{i5}} - x_{i3}/(x_{i4} + t_k) \geq 0, i = 1,2$$

если $P_Type = 2$

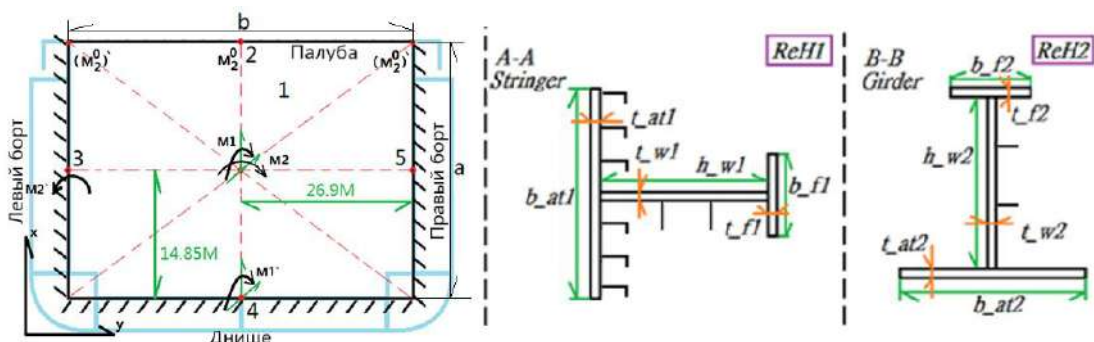


Рис. 2 Модель пластины и параметры, описывающие размеры поперечного сечения элементов переборки. Изгибающие моменты в «горячих» точках

$$g_{6+i}(X) = 200/\sqrt{x_{i5}} - x_{i3}/(x_{i4} + t_k) \geq 0, i = 1,2$$

$$g_{8+i}(X) = x_{i4} - x_{i2} \geq 0, i = 1,2 \quad (14)$$

где P_Type - тип профиля рамной балки; $P_Type = 1$ соответствует сварному составному профилю с симметричным пояском, а $P_Type = 2$ - сварному составному профилю с односторонним пояском; $k(x_{i5}) = 295/(x_{i5} + 60)$ - коэффициент использования механических свойств стали повышенной прочности, определяемый в соответствии с требованиями Правил DnV-GL.

Текущие (вычисляемые в итерационных циклах поисковой процедуры) фактические значения моментов сопротивления поперечного сечения профилей определяются известными зависимостями для составного таврового профиля. При наличии больших вырезов в стенке балок, как это показано на рис. 1 применительно к стенке рамных стоек площадь сечения стенки должна быть уменьшена на величину $\Delta f_{w_i2} = b_{mh_i2} x_{i2}$, $i = 1,2$ где b_{mh_i2} - ширина выреза в стенке шельфов ($i = 1$) и рамных стоек ($i = 2$) (задаются в исходных данных).

Требуемые Правилами DnV-GL [1] значения минимального момента сопротивления поперечного сечения и площади стенки рамных стоек и шельфов определяются следующими зависимостями:

$$W_{i_req}(\mathbf{X}) = \frac{M_{i_des}(\mathbf{X})}{\sigma_{perm}(x_{i5})} 10^3; \quad (15)$$

$$\sigma_{perm}(x_{i5}) = 150/k(x_{i5}), \text{ МПа} \quad (16)$$

$$f_{w_i_req}(\mathbf{X}) = 10 \frac{N_{i_des}(\mathbf{X})}{\tau_{perm}}; \quad (17)$$

$$\tau_{perm}(x_{i5}) = 100/k(x_{i5}), \text{ МПа} \quad (18)$$

где: $M_{i_des}(\mathbf{X})$ - расчетный изгибающий момент: для шельфа:

$$M_{1_des}(\mathbf{X}) = k_7(\gamma(\mathbf{X})) a_1 p b^2 \quad (19)$$

для рамной стойки:

$$M_{1_des}(\mathbf{X}) = k_6(\gamma(\mathbf{X})) a_2 p b^2 \quad (20)$$

$N_{i_des}(\mathbf{X})$ - расчетная перерезывающая сила: для шельфа:

$$N_{1_des}(\mathbf{X}) = 0.5 a_1 p a \quad (21)$$

для рамной стойки:

$$N_{2_des}(\mathbf{X}) = 1.0 a_2 p a \quad (22)$$

Расчетное условное равномерно распределенное давление p , связанное воздействием сил инерции при качке контейнеровоза, определялось по формулам:

$$p = (m_{c,Max} \times a_x) / A_{BD} \quad (23)$$

где $m_{c,Max}$ - максимальная общая масса контейнерных грузов между смежными переборками (для контейнеровоза 18 тыс. TEU в данной статье, $m_{c,Max} = 3800$ т); $a_x = 0.15g$ - расчетное среднее ускорение в центре штабеля, определяемое по требованиям DNV-GL; $g = 9.81$ м/с² - ускорение свободного падения, $A_{BD} = B_{bh}H_{bh} = 1598$ м² - расчетная площадь, на которой давление считается равномерно распределенным.

2. Проектирования рамного набора поперечной переборки контейнеровоза с контейнерной вместимостью 18 тыс. TEU

Общие данные по контейнеровозу:

Ширина судна расчетная	$B =$	59.000	м
Высота борта судна расчетная	$D =$	30.200	м
Осадка	$T =$	16.000	м
Расчетное водоизмещение	$\Delta =$	260970	т

Общие данные по конструкции переборки:

Высота переборки, м	$H_{bh} \equiv a$	29.7
Соотношение сторон переборки	$\gamma = a/b$	0.552
Расстояние между шельфами (среднее), мм	$a_1 =$	5940
Расстояние между рамными стойками, мм	$a_2 =$	2523
Толщина водонепроницаемой обшивки переборки, мм	$t_n =$	16
Толщина условной обшивки переборки (приведенная), мм	$t_B =$	3.8
Расстояние между нижней и верхней обшивками, мм	$h_B =$	1950
Расстояние между ребрами жесткости шельфа, мм	$a_{1_stiff} =$	650
Расстояние между ребрами жесткости рамной стойки, мм	$a_{2_stiff} =$	650
Модуль Юнга, МПа	$E =$	2.06 E+05
Добавка на коррозионный износ по требованиям DnV-GL, мм	$\Delta t =$	0.6
Расчетное давление, кПа	$p =$	3.6

Задача решалась с использованием инструмента MS Excel – Solver («Поиск решения»). Варьируемые параметры и значения параметров, определяющих область их допустимых значений, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Варьируемые параметры (шельф)	h_{w1}	t_{w1}	b_{f1}	t_{f1}	R_{eH_1}
	мм	мм	мм	мм	МПа
Решение	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
Верхняя граница	1950	11.6	243.4	11.6	315
Нижняя граница	1950	18.0	600.0	30.0	390
Принятые значения	1950	9.0	150.0	10.0	235
Оригинальные значения ¹⁾	1950	12.0	250.0	12.0	315

Варьируемые параметры (рамные стойки)	h_{w2}	t_{w2}	b_{f2}	t_{f2}	R_{eH_2}
	мм	мм	мм	мм	МПа
Решение	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}
Верхняя граница	1950	11.6	363.0	15.5	315
Нижняя граница	1950	16.0	600.0	30.0	390
Принятые значения	1950	9.0	150.0	10.0	235
Оригинальные значения ¹⁾	1950	12.4	350.0	16.4	315

Примечание:

¹⁾ - все толщины являются толщинами нетто; построечные толщины должны быть увеличены на величину коррозионной добавки.

Ниже представлена структура задачи, значения целевой функции и ограничений, соответствующие полученному решению, а также при значениях, выбранных по результатам решения и принятых в оригинальном проекте.

Структура задачи и результаты решения:

Функция цели (характеристика массы рамного набора)	Значение
$GF(X) = \sum_i \{(x_{i1}x_{i2} + x_{i3}x_{i4})N_i l_i\}, M^3$	22.28 ¹⁾
	22.99 ²⁾
	23.55 ³⁾

Примечание:

¹⁾ - значение функции цели в соответствии с полученным решением

²⁾ - значение функции цели при принятых параметрах рам

³⁾ - значение функции цели при оригинальных величинах параметров рам в проекте

Таблица 2

Ограничения-равенства	Значение	Смысловое содержание ограничения
$h_1(X) = x_{11} - x_{21} = 0$	0.0	$h_{w1} = h_{w2}$
$h_2(X) = x_{11} - h_{w1_fixed} = 0$	0.0	$h_{w1} = h_{w1_fixed}$
$h_3(X) = x_{15} - x_{25} = 0$	0.0	$R_{eH1} = R_{eH2}$
$h_4(X) = x_{11} - R_{eH_fixed} = 0$	0.0	$R_{eH1} = R_{eH_fixed}$
Ограничения-неравенства	Значение	Смысловое содержание ограничения
$g_1(X) = W_{g_act}(X) - W_{g_req}(X) \geq 0$	0.0	Условие местной прочности рамной стойки (изгиб)

$g_2(\mathbf{X}) = f_{w_g_act}(X) - f_{w_g_req}(X) \geq 0$	92.2	Условие местной прочности рамной стойки (сдвиг)
$g_3(X) = W_{s_act}(X) - W_{s_req}(X) \geq 0$	0.0	Условие местной прочности шельфа (изгиб)
$g_4(\mathbf{X}) = f_{w_s_act}(X) - f_{w_s_req}(X) \geq 0$	204.9	Условие местной прочности шельфа (сдвиг)
$g_5(\mathbf{X}) = (x_{12} + t_k) - a_{1_stiff} / (60\sqrt{k(x_{15})}) \geq 0$	0	Условие устойчивости стенки шельфа
$g_6(\mathbf{X}) = (x_{22} + t_k) - a_{2_stiff} / (60\sqrt{k(x_{25})}) \geq 0$	0	Условие устойчивости стенки рамной стойки
$g_7(\mathbf{X}) = 400/\sqrt{x_{15}} - x_{13}/(x_{14} + t_k) \geq 0$	2.61	Условие устойчивости пояска шельфа
$g_8(\mathbf{X}) = 400/\sqrt{x_{25}} - x_{23}/(x_{24} + t_k) \geq 0$	0	Условие устойчивости пояска рамной стойки
$g_9(\mathbf{X}) = x_{14} - x_{12} \geq 0$	0	Толщина пояска шельфа \geq толщины стенки
$g_{10}(\mathbf{X}) = x_{24} - x_{22} \geq 0$	3.9	Толщина пояска рамной стойки \geq толщины стенки

Ограничения, определяющие область допустимых значений варьируемых параметров, (двадцать ограничений) также были включены в состав задачи. Конкретные значения верхней и нижней границ варьируемых параметров, принятые на основе результатов предшествующих этапов проектирования, а также конструктивных и технологических соображений, приведены в таблице 1.

Выводы

В статье представлен новый подход к проектированию рамного набора поперечной переборки крупнотоннажного контейнеровоза на ранней стадии разработки проекта, основанный на оптимизационно-поисковых процедурах в сочетании с методикой расчета составных (конструктивно-ортотропных) пластин. Предложенный подход имеет следующие достоинства:

1. Экономия времени и упрощение процесса проектирования по сравнению с традиционным проектированием с использованием последовательных приближений на основе серии расчетов методом конечных элементов (МКЭ).
2. Обеспечивается подготовка исходной информации по конструкции переборки для последующего более детального МКЭ-анализа.

3. Применение для проектирования поперечной переборки контейнеровоза методики её моделирования в виде составной (конструктивно-ортотропной) пластины в сочетании с оптимизационно-поисковыми процедурами позволяет избежать учета большого числа необходимых ограничений, формирование некоторых из них может быть затруднительным или невозможным.

4. Предложенная постановка задачи обеспечивает гибкий подход для конструктора в плане учета различных конструктивных, технологических и прочих ограничений, которые могут появляться в процессе реального проектирования.

Сопоставление полученного оптимального решения с оригинальными проектными результатами показывает, что использование методики представления переборки в виде составной пластины не приводит к большим ошибкам оценки расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил и обеспечивает приемлемые результаты на начальных стадиях проектирования конструкций корпуса судна. Это говорит о целесообразности практического применения предложенного подхода в качестве первого приближения.

Литература

1. Structural Rules for Container Ships, Rules for Classification and Construction, DNV GL SE, Hamburg, Germany, 2016.
2. Юй Синьянь Алгоритмы и методики оптимизационно-поискового проектирования конструкций корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на основе требований правил классификационных обществ и нормативов DNV-GL, диссертация на соискание ученой степени кандидата тех. наук, СПб, 2021.
3. Короткин Я.И., Локшин А.З., Сиверс Н.Л. Изгиб и устойчивость пластин и круговых цилиндрических оболочек. Л. Судостроение, 1955.
4. Гарин Э.Н., Трякин В.Н. Основные положения требований к конструкциям плавучих доков в Правила Регистра СССР 1990. Регистр СССР, Научно-технический сборник, вып. 18, М.: «Транспорт», 1991, с. 18-37.
5. Трякин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, раздел. 2. СПб.ГМТУ, 2006.
6. Шиманский Ю.А. Справочник по строительной механике корабля т.2. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1958, 526с.
7. Бойцов Г. В., Палий О. М., Постнов В. А., Справочник по строительной механике корабля, Том 2. Л.: Судостроение, 1982, 376с.

References

1. Structural Rules for Container Ships, Rules for Classification and Construction, DNV GL SE, Hamburg, Germany, 2016.
2. Юй Синьянь Algorithms and Methods for Optimization and Search Design of Large Container Hull Structures Based on the Requirements of Classification Societies Rules and DNV-GL Rules, Ph.D. thesis, St. Petersburg, 2021.
3. Korotkin Y.I., Lokshin A.Z., Sivers N.L. Bending and Buckling of Plates and Circular Cylindrical Shells. L. Shipbuilding, 1955.
4. Garin E.N., Tryaskin V.N. Basic Provisions of Requirements for Floating Dock Designs in USSR Register Rules 1990. Register of the USSR, Scientific and Technical Collection, Issue 18, Moscow: "Transport", 1991, pp. 18-37.
5. Tryaskin V.N. Methodology of Automatic design of vessel hull structures. D. thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, sec. 2. SPb.SMTU, 2006.
6. Shimanskiy Yu.A. Manual of the construction mechanics of the ship T.2. L.: State Union Publishing House of Shipbuilding Industry, 1958, 526 pp.
7. Boytsov G.V., Paliy O.M., Postnov V.A., Manual of Ship Structure Mechanics, T.2. L.: Shipbuilding, 1982, 376 pp.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юй Синьянь, аспирант кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

Владимир Николаевич Тряскин, Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструкции судов Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Yu Xinyan, Ph.D – PhD-student of the Ships Structures and Technical Maintenance Department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

Vladimir Nikolayevich Tryaskin, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Ships Structures and Technical Maintenance Department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Поступила в редакцию: 19.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.791.042.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.007>

Разработка физических моделей для расчёта тепловых полей при мокрой подводной сварке

В.В. Мурзин¹, e-mail: ksv@smtu.ru К.М. Сое¹, e-mail : kyawminsoe4971@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается влияние на развитие технологии мокрой подводной сварки использование методов математического моделирования значительно облегчает исследование тепловых потоков, что позволяет рассчитать скорость охлаждения металла в опасном диапазоне температур (800-500оС) и определить свойства металла сварного соединения. Определяющую роль в сварке играет теплообмен, который формирует протекание физико-химических, диффузионных, гидродинамических процессов. Форма сварочной ванны, а значит, объем и теплосодержание характеризуется ее длиной, шириной, толщиной и глубиной проплавления основного металла. Сварочная ванна ограничивается изотермической поверхностью, имеющей температуру плавления основного металла. Предполагается, что на свойства сварного соединения влияет только энергия, поступающая в основной металл. В известных физических образах и математических моделях теплового процесса сварки и наплавки не рассматривается, какое влияние на околошовную зону оказывают потоки теплоты от объема (массы) металла сварочной ванны, хотя в некоторых моделях изучается влияние скрытой теплоты плавления на тепловое состояние основного металла.

Ключевые слова: сварка, мокрая подводная сварка, физических моделей, тепловых полей, тонкая пластина.

Development of physical models for calculating thermal fields in wet underwater welding

Viktor V. Murzin¹, e-mail: ksv@smtu.ru, Kyaw M. Soe¹, e-mail : kyawminsoe4971@gmail.com

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

Abstract. The article discusses the impact on the development of wet underwater welding technology the use of mathematical modeling methods significantly facilitates the study of heat flows, which allows us to calculate the cooling rate of the metal in the dangerous temperature range (800-500oC) and determine the properties of the metal of the welded joint. The decisive role in welding is played by heat transfer, which forms the flow of physico-chemical, diffusion, and hydrodynamic processes. The shape of the weld pool, and hence the volume and heat content, is characterized by its length, width, thickness, and depth of penetration of the base metal. The welding bath is limited to an isothermal surface having a melting point of the base metal. It is assumed that the properties of the welded joint are affected only by the energy entering the base metal. In the known physical images and mathematical models of the thermal process of welding and surfacing, it is not considered what effect the heat fluxes from the volume (mass) have on the near-seam zone) the effect of the latent heat of melting on the thermal state of the base metal is studied in some models.

Keywords: welding, wet underwater welding, physical models, thermal fields, thin plate.

Введение

Моделирование любых процессов, сопровождающих сварку, начинается с построения физического образа. Разработано достаточно большое количество физических и метаматематических моделей при сварке и наплавке (1,2,5). Максимальная плотность теплового потока, вводимая в изделие, меняется в зависимости от способа сварки (наплавки) от $0,4 \times 10^5$ до $3,5 \times 10^5$ Вт/м² [2]. На перегрев сварочной ванны может расходоваться от 0,5 до 10 % общей выделенной тепловой энергии [3]. После прохождения дуги (источника теплоты) эта часть тепловой энергии продолжает оказывать влияние на зону термического влияния. Объем сварочной ванны в зависимости от способа и режима сварки или наплавки меняется от 0,1 до 40 см³.

Сварочные процессы в металле в большинстве случаев происходят при быстром изменении температуры в пределах от температуры окружающего воздуха до температуры испарения металла. В этом температурном промежутке развиваются различные физические и химические

процессы плавления основного и электродного металла, структурные и объемные изменения в металле шва и в основном металле, процессы местного пластического деформирования. Для управления сварочными процессами необходимо знать, как влияют на них все определяющие параметры, включая изменение температуры металла во времени [4].

Для расчетов тепловых процессов при сварке наиболее простым является метод источников. Применяя этот метод для тепловых расчетов теплофизические характеристики принимают постоянными, независимо от температуры. Также пренебрегают и теплотой фазовых превращений. Значение этих теплофизических величин принимают средними в диапазоне температур, которые рассматриваются, хотя это и ведет к определенным погрешностям расчетных температурных полей по сравнению с реально существующими. Процессы распространения тепла в условиях сварки являются достаточно сложными. Из аналитических методов наиболее часто используют метод Фурье. Для расчетов применительно к сварке наиболее простым является метод источников [5].

Постановка и решение источников теплоты

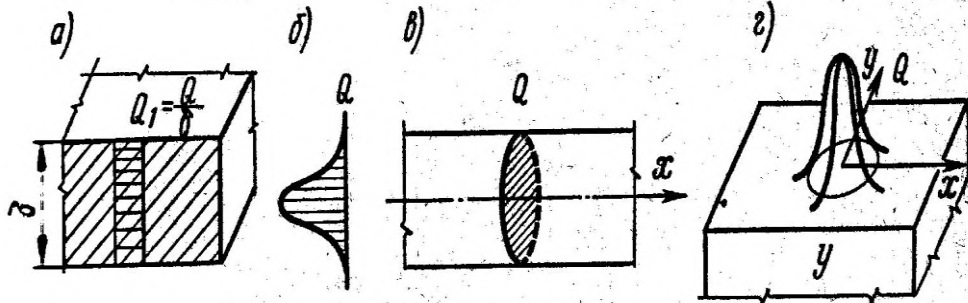


Рис. 1. Расчетные схемы мгновенных источников теплоты: а - линейный источник в пластине; б - нормально линейный источник; в - плоский источник в стержне; г - нормально круговой источник на поверхности полубесконечного тела

Источники тепла, встречающиеся в практических случаях сварки, являются достаточно разнообразными. Их схематизируют по различным признакам:

1. по признаку распределённости: сосредоточенные (точечные, линейные, плоские, объёмные) и распределённые (по определённому закону ввода тепла в изделие) (например, рис.1).
 2. по времени действия: мгновенные и непрерывно действующие источники тепла;
 3. по расположению относительно рассматриваемой точки во времени: неподвижные, подвижные, быстро движущиеся источники тепла.
- Процесс сварки под водой приводит к необходимости учитывать следующие факторы.

Теплоотдача с лицевой поверхности пластины и теплоотдача с обратной поверхности пластины, в отличие от сварки на воздухе, может значительно отличаться. Величина теплоотдачи зависит от многих факторов, от типа кипения: первая стадия - пузырьковое кипение, вторая стадия - пленочное кипение и при увеличении теплового потока, третья стадия - кипение в объеме жидкости, которое наблюдается при ещё большем тепловом потоке.

При мокрой подводной сварке наблюдается пузырьковое кипение. Величина теплоотдачи также зависит от температуры поверхности, теплоотдача повышается при повышении температуры.

В работе [6] исследовались термические циклы при ручной подводной сварке покрытыми

электродами в нижнем положении. Эксперимент ставился с целью изучения коэффициентов теплоотдачи. Схема эксперимента включала четыре опыта: 1. сварка под водой, 2. сварка в контакте только нижней поверхности пластины с водой, 3. сварка в контакте только верхней поверхности пластины с водой, 4. сварка на воздухе. В работе установлено, что при расчете необходимо использовать схему нормально кругового источника на поверхности полубесконечного тела, поскольку тепло вводится в основной металл на значительной площади. Также был сделан вывод, что немаловажную роль в теплоотдаче играют конвективные потоки, вызванные всплыванием газовых пузырей, возникающих в результате горения дуги.

Для этого выполнялись исследования, направленные на изучение интенсивности газообразования в зависимости от режима подводной сварки представленные в работе [5].

Работа [8] позволяет сделать вывод о средней скорости всплывания газовых пузырьков в воде. Эти результаты полезны при анализе тепловых потоков, передаваемых путем конвекции [2,7], особенно при сварке вертикальных и горизонтальных швов.

Таким образом, анализ общей тепловой обстановки при подводной сварке позволяет предложить следующие физические модели теплопередачи.

1. Сварка в нижнем положении, рис.2.

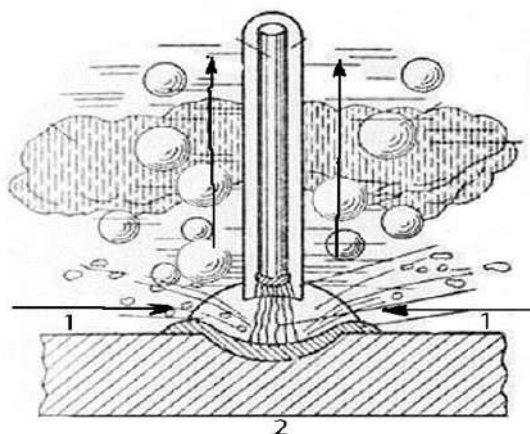


Рис. 2. Подводная сварка покрытыми электродами в нижнем положении. 1 - верхняя поверхность пластины. 2 - нижняя поверхность пластины.

На рис.2 представлена схема мокрой подводной сварки в нижнем положении. Общеизвестно, что при горении дуги под водой наблюдается пульсирующее образование газовых пузырей, каждый последующий образуется на остатках предыдущего. Таким образом, пузыри, устремляющиеся вверх (средняя скорость известна), увлекают находящуюся вблизи дуги воду. Потoki воды, отмеченные стрелками на рисунке, приводят к интенсивному охлаждению основного металла. В зависимости от толщины металла и режима сварки, температура нижней поверхности пластины (2) может превысить температуру кипения воды, что

приведет к образованию газовой подушки и резкому снижению теплоотдачи.

2. Подводная сварка вертикальных и горизонтальных швов.

Принципиально тепловая обстановка при сварке в этих пространственных положениях отличается незначительно (рис.3)

При этом варианте подводной сварки также возникают потоки жидкости, с лицевой стороны за счет всплытия газовых пузырей, с обратной стороны - за счет конвективных потоков, но при превышении температуры кипения, тепловой поток с обратной стороны пластины экранируется парами жидкости.

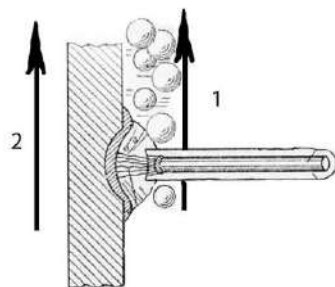


Рис. 3. Подводная сварка в вертикальном и горизонтальном пространственном положении. 1 - лицевая сторона пластины, 2 - обратная сторона пластины

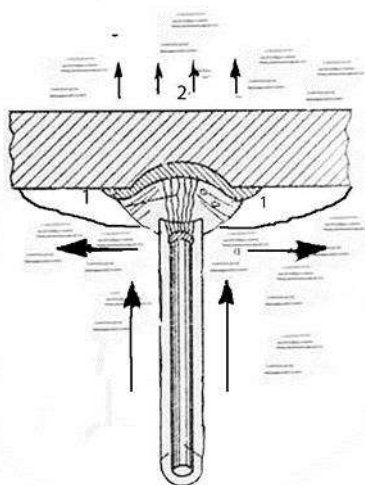


Рис. 4. Схема подводной сварки в потолочном положении. 1 - лицевая поверхность пластины. 2 - обратная сторона пластины

Вариант 3. Подводная сварка в потолочном положении, рис.4.

В этом случае с лицевой стороны пластины (1) наблюдается образование устойчивого газового пузыря, который существенно снижает теплоотвод. На обратной поверхности (2) наблюдается теплоотвод за счет конвективных потоков. Так же, как и в предыдущих случаях, превышение температуры кипения жидкости изменит характер теплоотвода с конвективного на пузырьковое кипение.

Выводы

1. Анализ характера теплоотвода от пластины при подводной сварке в различных пространственных положениях позволил разработать ряд физических моделей, учитывающих характер теплоотвода.
2. Показано, что при подводной сварке на обратной стороне пластины наблюдается изменение характера теплоотвода с конвективного на пузырьковое кипение.
3. Установлено, что расчетные формулы должны использовать математические модели конвекции.

Литература

1. В.В.Яковлев, С.М.Шанчуров, И.В.Першин. Вычислительный эксперимент при изучении сварочных процессов. Автоматизация и современные технологии. 2007, № 8. С. 16 – 20.
2. Б.М.Березовский. Математические модели дуговой сварки. В 4-х томах. - Челябинск. Изд - во Ю-УрГУ, 2003 – 560 с.
3. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов /Киев: «Вища школа», 1976, 424 с.
4. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке/В.А.Кархин. – 2-е изд., перераб. и доп. - СПб Изд-во Политехн. ун-та, 2015.– 572 с.
5. Киав Мин Сое, Карпов В.М., Мурзин В.В., Исследование влияния режима подводной сварки на газообразование, Морские интеллектуальные технологии -№3 (45) Т. 2 2019, С.111-116.
6. Руссо В.Л., Мурзин В.В., Ручная подводная сварка конструкций из стали повышенной прочности. Сварочное производство. № 1, 1993.
7. Андреев В.К., Гапоненко Ю.А., Гончарова О.Н., Пухначев В.В. Современные математические модели конвекции. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
8. Коткин Г. Всплывающий воздушный пузырек и закон Архимеда // Квант. – 1976. – № 1. – С. 19-23. (1996. – № 3. – С. 50-51.)
9. Завьялов В.Е. Технология сварки плавлением: учеб. пособие/ В.Е.Завьялов, И.В. Иванова, Н.Г. Кобецкой. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018.
10. Бурмистров Е.Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте : учебник / Е.Г. Бурмистров. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2019.

References

1. V. V. Yakovlev, S. M. Shanchurov, I. V. Pershin. Computational experiment in the study of welding processes. Automation and modern technologies. 2007, No. 8. pp. 16-20.
2. B. M. Berezovsky. Mathematical models of arc welding. In 4 volumes. - Chelyabinsk. Yu-USU Publishing House, 2003-560 p.
3. Bagryansky K. V., Dobrotina Z. A., Khrenov K. K. Theory of welding processes / Kiev: "Vishcha shkola", 1976, 424 p.
4. Karkhin V. A. Thermal processes in welding/V. A. Karkhin. - 2nd ed., reprint. and add. - St. Petersburg Polytechnic University Publishing House. un-ta, 2015– - 572 p.
5. Kiav Min Soe, Karpov V. M., Murzin V. V., Investigation of the influence of the underwater welding regime on gas formation, Marine intelligent technologies-No. 3 (45) Vol. 2 2019, pp. 111-116.
6. Russo V. L., Murzin V. V., Manual underwater welding of structures made of high-strength steel. Welding production. No. 1, 1993.
7. Andreev V. K., Gaponenko, Y. A., Goncharova O. N., Pukhnachev, V. V. Modern mathematical models of convection. - M.: FIZMATLIT, 2008.
8. Kotkin G. pop-up air bubble and the law of Archimedes // quantum. – 1976. – No. 1. – S. 19-23. (1996. – № 3. – P. 50-51.)
9. Zavyalov V. E. Technology of welding by melting: textbook. manual/ V. E. Zavyalov, I. V. Ivanova, N. G. Kobetskoy. - St. Petersburg: Polytech Publishing House. un-ta, 2018.
10. Burmistrov E. G. Fundamentals of welding and gas-thermal processes in shipbuilding and ship repair: textbook / E. G. Burmistrov. - 2nd ed., ster. - Saint Petersburg: Lan, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Васильевич Мурзин, к.т.н., доцент кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10, тел.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

Киав Мин Сое, аспирант кафедры сварки судовых конструкций, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10, e-mail: kyawminsoe4971@gmail.com

Viktor V. Murzin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding of Ship Structures, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 190008, Saint Petersburg, ul. Lotsmanskaya, 10, tel.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

Kyaw Min Soe, Post-graduate student of Ship Structure Welding Department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 10, Lotsmanskaya str., Saint Petersburg, 190008, e-mail: kyawminsoe4971@gmail.com

Поступила в редакцию: 24.05.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 621.868:629.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.008>

К вопросу о возможности технологического перемещения крупных сборочно-монтажных единиц по ледяным транспортировочным путям

Н.И. Герасимов¹, e-mail: GerasimovNI@sstc.spb.ru В.Н. Кравчишин¹, e-mail: ontc@sstc.spb.ru,
В.В. Горелов¹, e-mail: Gorelovvv@sstc.spb.ru

¹Центр технологии судостроения и судоремонта

Аннотация. В настоящей работе авторами приводится теоретический анализ практической возможности транспортирования тяжеловесного судового оборудования или сборочно-монтажных единиц (СМЕ) судового оборудования по специально созданным технологическим ледяным путям. Для обоснования выбранной темы научного исследования авторы ссылаются на ряд литературных источников, посвященных вопросам практического использования льда в качестве материала для транспортирования различных грузов. Приводятся примеры использования льда для создания: взлетно-посадочных полос аэродромов; переправ через водные преграды; зимних трасс в северных широтах в России и ряде других стран для транспортирования тяжеловесных сооружений и т.п.

Авторами рассматриваются физико-механические свойства пресноводного льда с целью определения параметров транспортировочных балок, включающих в свой состав опорный ледяной массив.

В статье приведена схема расположения и назначение элементов транспортировочной оснастки, расположенной под полкой агрегата СМЕ.

Выполненное теоретическое исследование совместной работы транспортировочной балки с ледяным массивом, упругой компенсирующей прокладкой и жесткой полкой СМЕ позволило установить взаимосвязь толщины ледового бруса и толщины прокладки с упругой деформацией транспортировочного пути и его жесткостью, используя которую можно обоснованно назначать:

- толщину сечения ледового бруса и грузонесущей балки;
- параметры сечения и материал компенсирующей прокладки;
- размеры транспортировочной балки и в целом конструкцию транспортировочных путей.

Ключевые слова: сборочно-монтажные единицы, технология перемещения, ледовые дорожки, судовое оборудование, транспортировка грузов, оснастка, опорные конструкции

By the problem of the possibility of technological movement of large assembly units along ice transportation routes

Nikolay I. Gerasimov¹, e-mail: GerasimovNI@sstc.spb.ru, Vladimir N. Kravchishin¹, e-mail: ontc@sstc.spb.ru,
Vladimir V. Gorelov¹, e-mail: Gorelovvv@sstc.spb.ru

¹Shipbuilding and shiprepair technology center

Annotation. In this article, the authors investigate the theoretical analysis of the practical possibilities of transporting heavyweight ship equipment or assembly units of ship equipment on the specially created technological ice paths. For substantiate the chosen theme of scientific research, the authors refer to a number of scientific sources devoted to the practical use of ice as a material for the transportation of various cargoes. Examples of using ice to create: airfield runways; crossings over water obstacles; winter routes in the northern territories of Russia and other countries for the transportation of heavy constructions, etc.

The authors investigate the physical and mechanical properties of freshwater ice in order to determine the parameters of the transport beams, which include the supporting ice block.

The article shows the layout and purpose of the elements of the transportation equipment located under the shelf of the assembly unit.

The results theoretical research of the operation of a transport beam with the ice block, the elastic compensating gasket and the bearing construction assembly unit made possible to determine the correlation between the thickness of the ice block and the thickness of the gasket with the elastic deformation of the transportation path and its rigidity, using which one we can reasonably assign:

- the thickness of the section of the ice block and the load-carrying beam;
- section parameters and material of the compensating gasket;
- the parameters of the transport beam and the construction of the transport routes in general.

Key words: assembly units, moving technology, ice paths, ship equipment, transportation of cargoes, rigging, bearing constructions

Введение

В отечественной и зарубежной практике довольно часто используется способ перемещения тяжеловесных изделий непосредственно по льду. В условиях нашей страны до сих пор в северных ее регионах единственным способом доставки тяжеловесных грузов до некоторых отдаленных населенных пунктов в зимнее время осуществляется через ледовые переправы рек и озер [1,2,3,4,5].

Немало примеров транспортирования тяжеловесов по льду можно привести и за рубежом. Так, например, в Японии предложен и запатентован способ перемещения крупногабаритных судовых секций по ледоформам [6].

В этой связи рассмотрим возможность технологического перемещения (транспортирования) крупных СМЕ от судна к цеху и обратно с использованием льда, а также

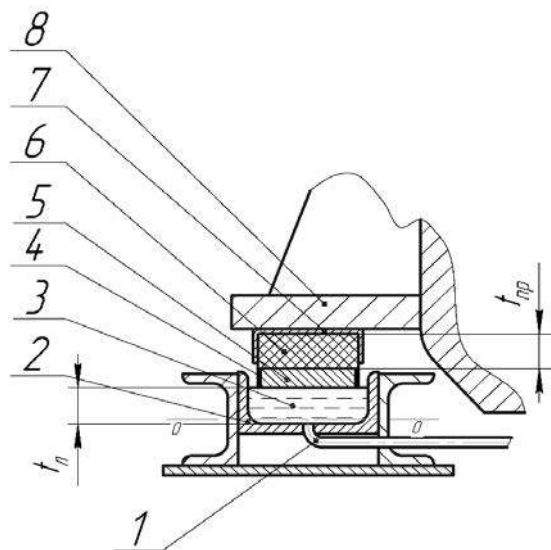
непосредственной погрузки их в судовые отсеки [7, 8].

При перемещении по ледовым дорожкам необходимо обеспечить их равномерное нагружение по всей контактируемой длине с опорными конструкциями сборочно-монтажных единиц. Это не простая задача, т.к. недостаточная жесткость технологических балок транспортировочных путей большой протяженности (десятки-сотни метров), неточность взаиморасположения полок перемещаемой СМЕ, которая является более жесткой конструкцией, вызывают неравномерное продольное нагружение ледовых покрытий, что может привести к утрате его работоспособности, то есть разрушению. Подобные задачи исследования проводились ранее при определении зависимости упругого сближения опорных поверхностей от параметров элементов качения [9].

Известно из работ [10, 11], что опасную перегрузку роликовых дорожек можно снизить, используя более податливые пустотелые цилиндрические ролики.

Физико-математическая модель механизма силового совместного взаимодействия ледяной дорожки и элементов транспортировочной оснастки

Поэтому для нашего случая используем упругоподатливые резиновые прокладки – компенсаторы (например, листы технической резины), устанавливаемые между полками перемещаемой СМЕ и металлическими опорами, шарнирно с помощью осей, поз.10, связанными друг с другом, образуя опорные траки, поз.5 (рис., рис. 1, 2).



1 – трубопровод 2 – балка транспортировочная; 3 – ледяной массив; 4 – облицовка антифрикционная; 5 – опора металлическая; 6 – компенсатор резиновый; 7 – лоток; 8 – полка агрегата СМЕ

Рис.1. Схема расположения элементов транспортировочной оснастки под полкой агрегата СМЕ

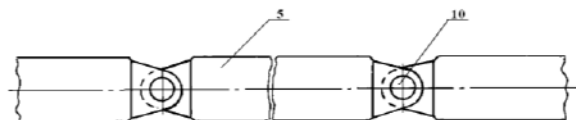


Рис. 2. Схема соединения опор (траков)

С целью назначения необходимых габаритов силовых элементов транспортировочных путей исследуем взаимосвязи влияния:

- толщины компенсирующей прокладки $t_{пр}$ на

распределение нагрузки на ледовую дорожку на длине полки агрегата;

- толщины и места расположения по высоте сечения транспортировочной балки ледяного массива дорожки $t_{л}$ на габариты транспортировочной балки и работоспособность в целом

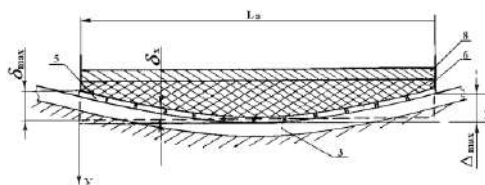
Для решения поставленных задач принимаем следующие условия:

1. Перемещаемая сборочно-монтажная единица является симметричным абсолютно жестким телом, имеет массу G и две опорные полки. Длина каждой полки - L_a .

2. При упругом сближении все металлические опоры (траки), находящиеся под полками СМЕ, взаимодействуют с ледовыми поверхностями путей.

3. В обеспечении повышения монтажной технологичности транспортировочные пути собираются из одинаковых по длине балок, каждая из которых устанавливается концевыми частями на специальные жесткие опоры - тумбы. Тогда длину пролета между опорами, равную длине балки, обозначим через L . При этом принимаем следующее допущение $L_a < L$.

Рассмотрим рисунок 3, представляющий схему сжатия статической силой $G/2$ упруго – податливой опоры, включающей резиновую прокладку и металлические опоры (траки), шарнирно соединенные между собой, и находящейся между полкой СМЕ и балкой транспортировочного пути.



3 – ледяной массив; 5 – опора металлическая (трак); 6 – компенсатор резиновый (прокладка); 8 – полка агрегата

Рис.3. Схема предельного упругого деформирования резиновой компенсирующей прокладки

В этом случае балка под действием нагрузки $G/2$ упруго прогнется и будет иметь профиль, описываемый в общем виде зависимостью:

$$\Delta_x = f(x)$$

Согласно схеме рисунка 3 просадка δ_x упруго – податливой опоры с координатой X будет также равна:

$$\delta_x = \delta_{max} - \Delta_x$$

где: δ_{max} - максимальная просадка упруго – податливой опоры, мм;
 Δ_x - текущая ордината профиля пути, мм.

Учитывая прямую пропорциональную зависимость между усилием и просадкой, подчиняющуюся закону Гука, значение δ_x можно выразить следующей известной формулой

$$\delta_x = \frac{P_x t_{np}}{E_{np} F_{np}^1}, \quad (1)$$

где: t_{np} - толщина компенсирующей прокладки;
 E_{np} - модуль упругости материала компенсирующей прокладки;
 F_{np}^1 - площадь компенсирующей прокладки, приходящейся на металлическую опору (башмак).

Тогда коэффициент пропорциональности прокладки C_{np} в данном случае будет определяться следующим уравнением

$$C_{np_x} = \frac{t_{np}}{E_{np} F_{np}^1} \quad (2)$$

Из формулы (1) выразим нагрузку в X-ом сечении

$$P_x = \frac{\delta_x}{C_{np}}$$

С учетом (2.31) можно записать как

$$P_x = \frac{\delta_{max} - \Delta_x}{C_{np}}$$

Для математического описания профиля пути от изгиба балки аппроксимируем его дугой окружности уравнением

$$\Delta_x = 4 \Delta_{max} \frac{X}{L_a} \left(1 - \frac{X}{L_a} \right) \quad (3)$$

Распределив условно нагрузку P_x ролика с координатой X на длину металлической опоры (башмака) l_{on} и проинтегрировав ее по длине L_a ,

получим суммарную нагрузку на одну ледовую дорожку, равную половине силы, возникающей от воздействия массы изделия.

$$\frac{G}{2} = \int_0^{L_a} \frac{P_x}{l_{on}} dx = \int_0^{L_a} \frac{\delta_{max} - \Delta_x}{C_{np} l_{on}} dx \quad (4)$$

Подставим значение Δ_x из выражения (3) в уравнение (4) и после интегрирования найдем δ_{max} .

$$\delta_{max} = \frac{G}{2} \frac{C_{np} l_{on}}{L_a} + \frac{2}{3} \Delta_{max} \quad (5)$$

После подстановки значения C_{np_x} в

уравнение (5), получим

$$\delta_{max} = \frac{G t_{np}}{2 n_{on} E_{np} F_{np}^1} + \frac{2}{3} \Delta_{max} \quad (6)$$

где $n_{on} = \frac{L_a}{l_{on}}$ - количество металлических

опор (башмаков) под полкой СМЕ.

Максимально допустимое значение деформации компенсирующих прокладок под крайними опорами должно подчиняться следующему условию

$$\delta_{max} = K_{np} \left[\delta_{np}^p \right],$$

где K_{np} - коэффициент, учитывающий

неравномерность загрузки компенсирующих прокладок из-за не параллельности полок агрегата.

$$\left[\delta_{np}^p \right] = \frac{\left[\sigma_{np}^p \right] t_{np}}{E_{np}} \quad - \text{ предельное значение}$$

упругой деформации компенсирующей прокладки.

Тогда, подставив в уравнение (6) значение δ_{max} , преобразуем относительно Δ_{max}

$$\Delta_{max} = \frac{1,5 t_{np}}{E_{np}} \left(K_{np} \left[\sigma_{np}^p \right] - \sigma_{np}^{cp} \right) \quad (7)$$

где: $\sigma_{np}^{cp} = \frac{G}{2 n_{on} F_{np}^1}$ - среднеарифметическое

значение напряжения в компенсирующих прокладках при равномерном их сжатии.

С другой стороны, согласно теории упругих деформаций максимальный прогиб самой балки на длине полки агрегата L_a определяется следующим уравнением (рис.4)

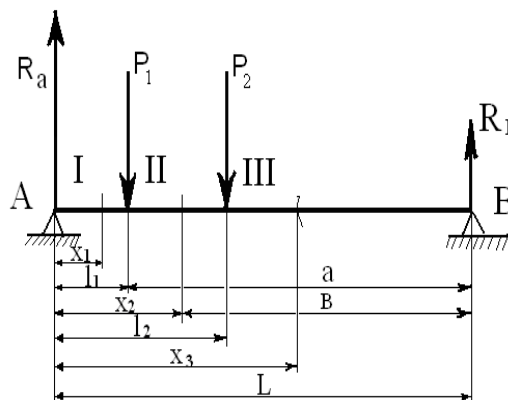


Рис. 4. Схема нагружения балки

$$\Delta_{\max} = \frac{P_1}{1296EJ} (55L_a^3 - 81LL_a^2) \quad (8)$$

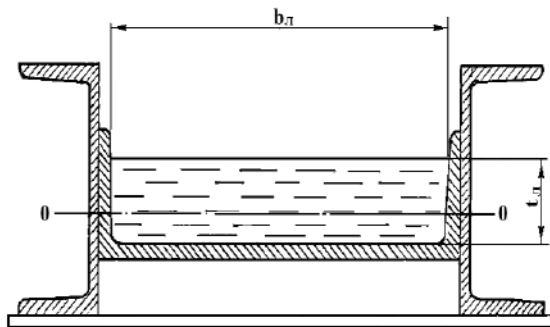
Полученное значение максимального прогиба балки после подстановки в формулу (7) позволяет найти зависимость параметров сечения балки от параметров компенсирующей прокладки, их предельной нагрузки, длины полок СМЕ и используемого материала балок.

$$t_{np} = \frac{P_1 E_{np} (55L_a^3 - 81L L_a^2)}{1944 E J (K_{np} [\sigma_{np}^p] - \sigma_{np}^{cp})} \quad (9)$$

Для определения предельно возможного изгиба ледового массива будем исходить из следующих положений:

1. Прочность льда примерно в 30 – 40 раз меньше прочности простой конструкционной стали и согласно данным работ [12,17] прочность пресноводного льда на сжатие и растяжение изменяется в зависимости от температуры. Так в диапазоне отрицательных температур -15-20°C прочность на сжатие и растяжение соответственно составляют 3,0-4,0 и 1,4-1,8 МПа, модуль упругости

$E_l \approx 9 \cdot 10^3$ МПа. Из приведенных характеристик пресноводного льда следует, что прочность льда на сжатие в два раза выше, чем на растяжение. Следовательно, расположение ледовых брусьев в балках транспортировочных путей необходимо размещать в нейтральной их плоскости изгиба, при этом высота ледового массива на сжатие должна быть в два раза больше, чем высота его на растяжение (рис.5).



b_l – ширина ледового массива; t_l – толщина ледового массива; О-О – нейтральная плоскость изгиба массива.

Рис.5. Схема расположения ледового массива в сечении силовой балки

2. При температуре от -3 до -40°C лед ведет себя как вполне упругое тело, которое подчиняется закону Гука, даже если возникающее напряжение все же превышает определенного значения, но при этом продолжительность его воздействия достаточно коротка.

Исходя из принятого расположения ледового массива относительно нейтральной оси балки, определим его максимально возможный совместный прогиб с грузонесущей балкой. Согласно схеме предельного упругого деформирования резиновой прокладки и

грузонесущей балки, представленной на рисунке 1, наибольший прогиб ледового массива будет в центральной его части. Рассмотрим отдельно от грузонесущей балки схему упругой деформации ледового массива, т.е. ледового бруса, при этом нейтральная плоскость изгиба, как уже отмечалось выше, будет располагаться от основания на $\frac{1}{3}$ его толщины.

Учитывая, что основную нагрузку от перемещаемой СМЕ несет балка, найдем те условные силы, которые при нагружении ледового бруса, имеющего длину L , и поперечные размеры $b_l \times t_l$, повторили бы профиль изогнутой балки. Согласно схеме рисунка 4. условный момент нагружения бруса для средней его части можно выразить следующим выражением

$$M_{cp}^{yc} = \left[P_1^{yc} \left(1 - \frac{l_1}{L} \right) + P_2^{yc} \left(1 - \frac{l_2}{L} \right) \right] \cdot x_2 - P_1^{yc} (x_2 - l_1)'$$

где: P_1^{yc}, P_2^{yc} - условные нагрузки на

брус, которые в нашем случае равны; $x_2 = \frac{L}{2}$ -

расстояние от опоры до середины балки.

Упростим уравнения момента бруса, тогда

$$M_{cp}^{yc} = \frac{P^{yc}}{2} (L + l_1 - l_2) \quad (10)$$

В найденном выражении не известна

P^{yc} . Согласно формуле о нормальном

(главном) напряжении при изгибе балки,

подставим значение M_{\max} в уравнение 10 и

выразим относительно P^{yc} . Тогда

$$P^{yc} = \frac{2[\sigma] W_l}{(L + l_1 - l_2)} \quad (11)$$

Подставим значение P^{yc} в уравнение

упругой деформации, получим максимальный прогиб ледового бруса (балки).

$$y_{\max}^l = \frac{[\sigma]}{12 E_{l,l} (L + l_1 - l_2)} \left(2(L - l_1 - l_2) L^2 - (L - 2l_1)^2 - 4 \left[(L - l_1) l_2 L - l_1 (L - l_1) l_2 L - l_2 \right] \right) \quad (12)$$

Совместно решая уравнения найденной упругой деформации ледового бруса и упругой деформации транспортировочной балки найдем зависимость момента инерции транспортировочной балки от толщины бруса.

$$J_{\max} = \frac{(L - L_a)(L + l_1 - l_2) P_1 E_{lt} t_l}{4 L E [\sigma_l]} \quad (13)$$

Выполним расчеты и проведем графическое исследование совместной работы балки, ледового бруса и прокладки, выполненной из технической резины. Пусть на каждую балку действуют по две силы по 300кН каждая. Длина балки $L = 600$ см, длина полки агрегата $L_a = 400$ см.

Отстояние от опоры А силы p_1 будет составлять 166,66см, а силы p_2 - 433,33см.

Согласно физико-механических показателей резина для амортизаторов марки 1847 и 51-1675 (1-я группа) имеет предел прочности $[\sigma] = 16$

МПа, модуль упругости $E_n = 500$ МПа. В результате выполненных расчетов построены графические зависимости толщины прокладки, льда и упругой деформации балки от момента инерции балки (рис.6).

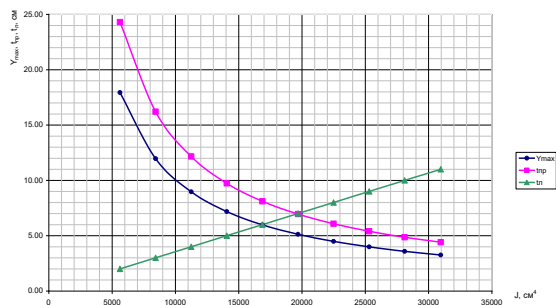


Рис.6. График зависимостей упругой деформации транспортировочного пути, толщин подкладного листа и ледового массива от момента инерции балки

Используя графические кривые рисунка 6, представляется возможным точно определить необходимые толщины упругой прокладки и ледового бруса в зависимости от момента инерции транспортировочной балки. Так, для нашего случая при выборе балки с моментом инерции сечения $1,5 \times 10^4 \text{ см}^4$ следует назначить толщину: компенсирующего слоя прокладки 9,1см и ледового бруса-5,3см.

Заключение

Выполненные исследования совместной работы транспортировочной балки с ледяным массивом, упругой компенсирующей прокладкой и жесткой полкой СМЕ позволили установить взаимосвязь толщины ледового бруса и толщины прокладки с упругой деформацией транспортировочного пути и его жесткостью, на основании которой представляется возможным определить:

- толщину сечения ледового бруса и грузонесущей балки;
- параметры сечения и материал компенсирующей прокладки;
- размеры транспортировочной балки и в целом конструкцию транспортировочных путей.

Литература

1. Седов Г.Я. Перевозки по льду предметов большого веса. М.: Водный транспорт, 1926. 146с.
2. Бернштейн С.А. Ледяная железнодорожная переправа: работа, теория и расчет ледяного слоя. М.: Транспечать, 1929. 42с.
3. Кашкин Н.Н. Исследование работы ледяных аэродромов под нагрузкой от самолета. М.: ОНТИ НКТП, 1935. 48с.
4. Иванов К.Е. Грузоподъемность ледяного покрова и устройство дорог на льду. Л.: Главсевморпуть, 1949. 182с.
5. Бреган Г.Р. Ледяные переправы. Свердловск: Гилпометеоиздат, 1943. 151с.
6. Акцептованная заявка Японии №51- 47238, Кл. 83/3/АК 01, 1976
7. Герасимов Н.И., Коврыжкин В.В., Никитенко В.А., Еремеев В.С. Устройство подъема и перемещения тяжеловесного оборудования. Авторское свидетельство № 906930 от 10.01.1980г.
8. Герасимов Н.И. Перспективная технология перемещения крупногабаритных и тяжеловесных сборочно-монтажных единиц энергетического оборудования. Судостроение. 2007. №4, с. 60-63.
9. Путвинская Е.И. К вопросу о контакте упругого пустотелого цилиндра с упругой плоскостью. «Труды КАИ», вып.43, 1958
10. Герасимов Н.И., Кудрявцев Ф.А., Костроменко И.Д., Образцов Б.М., Устройство для горизонтального накатывания на судовой фундамент крупногабаритного тяжеловеса. Авторское свидетельство № 673523 с приоритетом от 04.06.1976. Бюллетень «Открытия, изобретения», №26, 1979.
11. Герасимов Н.И., Греков А.П., Кудрявцев Ф.А., Бобровская З.М. Александров А.В., Николайчук П.А. Погрузка агрегата большой массы на одной роликовой дорожке. Авторское свидетельство № 166755 с приоритетом от 16.06.1980.
12. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л., Гидрометеиздат, 1980.
13. Вейнберг Б.П. Лед. М.; Л. Гостехиздат, 1934. 524с.
14. Богородский В.В., Гусев А.В., Хохлов Г.П. Физика пресноводного льда. Л.; Гидрометеиздат, 1971. 226с.
15. Бутягин И.П. Прочность льда и ледяного покрытия. Новосибирск; Наука, 1966. 153с.
16. Маэно Н. Наука о льде. Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 231с.

References

1. Sedov G.YA. Perevozki po ldu predmetov bolshogo vesa. [Transportation of heavy objects on ice]. M.: Vodnyy transport, 1926. 146с
2. Bernshteyn S.A. Ledyanaya zheleznodorozhnaya pereprava: rabota, teoriya i raschet ledyanogo sloya. [Icy railway crossing: operation, theory and ice sheet calculation]. M.: Transpechat, 1929.42с.

3. Kashkin N.N. Issledovaniye raboty ledyanykh aerodromov pod nagruzkoy ot samoleta. [Research of the operation of ice airfields under aircraft load]. M.: ONTI NKTP, 1935. 48с.
4. Ivanov K.E. Gruzopodyemnost ledyanogo pokrova i ustroystvo dorog na ldu. [Ice cover capacity and ice road construction]. L.: Glavsevmorput, 1949. 182с.
5. Bregman G.R. Ledyanyye perepravyy. [Ice crossings]. Sverdlovsk: Gilpometeoichlat, 1943. 151с.
6. Aktseptovannaya zayavka Yaponii №51- 47238, Kl. 83/3/AK 01, 1976
7. Gerasimov N.I., Kovryzhkin V.V., Nikitenko V.A., Yeremeyev V.S. Ustroystvo podyema i peremeshcheniya tyazhelovesnogo oborudovaniya. Avtorskoye svidetelstvo № 906930 ot 10.01.1980.
8. Gerasimov N.I. Perspektivnaya tekhnologiya peremeshcheniya krupnogabaritnykh i tyazhelovesnykh sborochno-montazhnykh yedinitz energeticheskogo oborudovaniya. [Advanced technology for moving large and heavy assembly units of power equipment]. Sudostroyeniye. 2007. №4, s. 60-63.
9. Putvinskaya E.I. K voprosu o kontakte uprugogo pustotologo tsilindra s uprugoy ploskost'yu. [By the problem on the contact of the elastic hollow cylinder with the elastic plane «Trudy KAI», vyp.43, 1958.
10. Gerasimov N.I., Kudryavtsev F.A., Kostromenko I.D., Obratsov B.M., Ustroystvo dlya gorizontaln'no nakatyvaniya na sudovoy fundament krupnogabaritnogo tyazhelovesa. [A device for horizontal rolling of a large-sized heavyweight onto a ship foundation]. Avtorskoye svidetelstvo № 673523 s prioritom ot 04.06.1976. Byulleten' «Otkrytiya, izobreteniya», №26, 1979.
11. Gerasimov N.I., Grekov A.P., Kudryavtsev F.A., Bobrovskaya Z.M. Aleksandrov A.V., Nikolaychuk P.A. Pogruzka agregata bol'shoi massy na odnoy rolikovoy dorozhke. [Loading a heavy machine on one roller track]. Avtorskoye svidetelstvo № 166755 s prioritom ot 16.06.1980.
12. Bogorodskiy V.V., Gavrilov V.P. Led. Fizicheskiye svoystva. Sovremennyye metody glyatsiologii. [Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology]. L., Gidrometeoizdat, 1980.
13. Veynberg B.P. Led. [Ice]. M.; L. Gostekhizdat, 1934. 524с.
14. Bogorodskiy V.V., Gusev A.V., Khokhlov G.P. Fizika presnovodnogo l'da. [Freshwater ice physics] / L.: Gidrometeoizdat, 1971, 226с.
15. Butyagin I.P. Prochnost' l'da i ledyanogo pokrytiya. [Ice and ice cover strength]. Novosibirsk; Nauka, 1966. 153с.
16. Maeno N. Nauka o l'de. [Ice science]. Per. s yap. M.: Mir, 1988. 231с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Иванович Герасимов, доктор технических наук, главный ученый секретарь, Центр технологии судостроения и судоремонта, 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, д.7, e-mail: GerasimovNI@sstc.spb.ru

Владимир Николаевич Кравчишин, кандидат технических наук, Центр технологии судостроения и судоремонта, 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, д.7, e-mail: e-mail: ontc@sstc.spb.ru

Владимир Витальевич Горелов, кандидат исторических наук, директор редакции, Центр технологии судостроения и судоремонта, 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, д.7, e-mail: Gorelovvv@sstc.spb.ru

Nikolay I. Gerasimov, Dr. Sci. (Eng), Chief scientific secretary Shipbuilding and shiprepair technology center, Promyshlennaya, 7, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: GerasimovNI@sstc.spb.ru

Vladimir N. Kravchishin, Ph. D. (Eng), Chief specialist, Shipbuilding and shiprepair technology center, Promyshlennaya, 7, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: e-mail: ontc@sstc.spb.ru

Vladimir V. Gorelov, Ph. D. (Hist), Director of editorial office, Shipbuilding and shiprepair technology center, Promyshlennaya, 7, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: e-mail: Gorelovvv@sstc.spb.ru

Поступила в редакцию: 20.06.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 629.5.081+658.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.009>

Основные направления развития автоматизированных систем управления и поддержки принятия решений в судостроении и организации рабочих мест

А.В. Фирсова¹, e-mail: firsova-a-v@mail.ru, Д.С. Хмара¹, e-mail: dskh@corp.smtu.ru,
М.А. Шальнов², e-mail: shalnov.ma@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²АО «Адмиралтейские верфи»

Аннотация На сегодняшний день на российских просторах интеллектуальные производства и связанные с ними технологии не имеют большого объема, но эта область активно развивается, имеет тенденции к расширению. Можно смело сказать, что при сложении передовых технологий обработки, сборки и управления производственными и бизнес-процессами, получится долгожданный синергетический эффект. Эта область имеет очень хорошие перспективы в различных отраслях промышленности, в частности – в судостроении. В период развития экономики нашей страны, направленный на импортозамещение и импортоопережение, как никогда акцент делается на внутренних разработках и независимости наших производственных и интеллектуальных технологий от санкций и прочих экономических и политических факторов. Качество конструкций и изделий в судостроении имеет актуальное значение в связи с выполнением предприятиями отрасли инновационных заказов, основными среди которых являются оборонные. Отечественные научные и производственные организации предлагают новейшие решения в сфере цифровых производств. Получают распространение роботизированные комплексы для обработки корпусных конструкций из судостроительных сталей и контрольных операций. Перспективными можно назвать направления освоения проектирования и постройки универсальных комплексных интеллектуальных систем, позволяющих быстро осваивать полный комплекс процессов судостроительного производства.

Ключевые слова: судостроение, автоматизация, цифровизация, интеллектуальные технологии, планирование, организация, технология судостроения, модули, автоматизированные рабочие места

The main directions of development of automated control systems and decision support in shipbuilding and workplace organization

Anna V. Firsova¹, e-mail: firsova-a-v@mail.ru, Dmitriy S. Khmara¹, e-mail: dskh@corp.smtu.ru,
Maksim A. Shalnov², e-mail: shalnov.ma@gmail.com

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²SC«Admiralty shipyards», St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Today, in the Russian open spaces, intellectual production and related technologies do not have a large volume, but this area is actively developing and has a tendency to expand. We can safely say that with the addition of advanced technologies for processing, assembly and management of production and business processes, you will get a long-awaited synergistic effect. This area has very good prospects in various industries, in particular-in shipbuilding. During the period of development of our country's economy, aimed at import substitution and import conservation, more than ever, the emphasis is on domestic developments and the independence of our production and intellectual technologies from sanctions and other economic and political factors. The quality of structures and products in the shipbuilding industry is of current importance in connection with the implementation of innovative orders by enterprises of the industry, the main ones among which are defense ones. Domestic scientific and industrial enterprises

Keywords: shipbuilding, automation, digitalization, intelligent technologies, planning, organization, shipbuilding technology, modules, automated workplaces

Введение

Современная ступень развития промышленности определяется применением более надежных и эффективных обрабатывающих и сборочно-монтажных технологий с автоматизированными и автоматическими системами управления. Инновационные технологии в этой области предлагаются не только ведущими зарубежными компаниями, но и отечественными производителями.

Глобальной целью внедрения на предприятии автоматизированных, автоматических и цифровых производственных технологий и интеллектуальных систем управления является снижение производственных издержек, сокращение циклов изготовления продукции, а также минимизация сроков реализации подготовительных этапов производства, повышение значений качественных характеристик разрабатываемой и производимой продукции, как следствие – снижение себестоимости, максимизация прибыли и формирование

положительного имиджа в совокупности с конкурентными преимуществами предприятия.

1. О предметной области

Инновационное производственное предприятие в общем виде представляет собой сложную автоматизированную технологическую систему, которая включает оборудование, обрабатывающие центры, автоматические комплексы складирования, учета, выдачи товарно-материальных ценностей (ТМЦ), объединенные с центрами управления, и обеспечивающие автоматизацию судостроительного производства широкого номенклатурного ряда регламентированным набором управляющих программ и связующих модулей.

Интеллектуальные производства обеспечивают быстрый переход от обработки одного изделия к обработке другому, одновременно обеспечивая выполнение различных операций.

Интеллектуальное предприятие должно отвечать самым высоким требованиям по точности,

быстродействию, надежности, а также обеспечивать поддержку полного цикла работ по созданию судостроительного изделия.

На рисунке 1 приведена условная схема процесса постройки судна во взаимосвязи с производствами завода-строителя.



Рис. 1. Условная схема поэтапного процесса создания судостроительной продукции

По итогу прохождения всех указанных этапов, судно передается от завода – строителя новому владельцу в собственность, для чего оформляются такие документы, как приемо–сдаточный акт, ведомости и сертификаты.

При эксплуатации судна необходимо проводить мероприятия для поддержания его в эксплуатационной готовности, а именно – ремонтные работы.

Эффективная деятельность предприятия подразумевает управление системой в условиях неопределенности изменений среды. Целесообразность принимаемых мер для адаптации к быстрым изменениям предполагает значительные усилия.

Интеллектуальной (Цифровой) верфью или интеллектуальным предприятием можно назвать комплексное вариативное сочетание автоматизированного, автоматического и роботизированного технологического оборудования, гибких производственных комплексов с автоматическим систематизированным обеспечением их поддержки на протяжении заданного периода. Она способна к

автоматизированной переналадке в процессе производстве изделий различной номенклатуры.

На функциональную архитектуру и систему взаимосвязей автоматизированных систем учета, анализа, принятия управленческих решений и непосредственно управления большое влияние оказывает необходимость взаимодействия с большим количеством автоматизированных подсистем в общем гибком управленческом комплексе.

Системы управления, взаимосвязанные с разрабатываемой единой системой варьируются от распространенных стандартных рабочих системами: автоматизированных рабочих мест (АРМ), вычислительных серверов (ВС), системы хранения данных (ХД), системы резервного копирования (РК).

Проектные решения предусматривают взаимосвязь системы «Интеллектуальное предприятие» с вышестоящим единым информационным пространством, внешними, внутренними и смежными автоматизированными системами: автоматизированных рабочих мест (АРМ), вычислительных серверов (ВС), системы хранения данных (ХД), системы резервного копирования (РК).

Наряду с функциональными группами, на архитектуру системы прямое влияние оказывает комплект требуемого оборудования, зачастую требующего особых условий для размещения и обслуживания: специализированное оборудование, входящее в сеть хранения данных; оборудование, входящее в локальную вычислительную сеть, телекоммуникационное оборудование; системы бесперебойного питания.

К внешним контактным категориям следует отнести: общесистемное программное обеспечение, прикладное и специальное программное обеспечение системы; дистанционные серверы резервирования; выделенные каналы передачи данных.

Исходя из функционала, структура единого информационного пространства судостроения представляется сложной организационно-технической системой с подсистемами (рис. 2):



Рис. 2. Типовая структура единого информационного пространства отрасли

2. Методологические основы проектирования систем управления и принятия решений с автоматизированными рабочими местами

Единая информационная среда может быть оценена количественными и качественными методами. Эффективность единой информационной среды определяется способностью выполнять поставленные задачи. Самым простым и распространенным способом оценки можно принять хорошо знакомый метод экспертных оценок. Создание экспертной группы и выявление мнения специалистов, компетентность которых predetermined. Используется «метод Дельфи» - неоднократное обращение к экспертам, вначале - для выявления текущей позиции с помощью углубленного интервью, а затем - для оценки уровня согласованности мнений.

Цель подготовительной стадии мониторинга эффективности системы - определение обобщенных критериев эффективности единой информационной среды. Результаты могут быть представлены в виде матрицы.

Эффективность единого информационного пространства, базируется на трех основных критериях:

— скорость и точность осуществления управленческих функций;

— качество информационных потоков;

— доступность информации для всех групп пользователей.

Для эффективного функционирования единая информационная среда должна выполнять следующие функции: актуальность и своевременность информации; защита информации; информационное обеспечение; координация и регулирование; обеспечение точного результата; расширение возможностей систем управления.

Важным условием для успешного управления цифровой системой является создание хранилищ – океанов информации и возможность своевременного и полноценного использования этих данных для целей проектирования, организации и анализа объекта и его вариаций.

Основой интеллектуального производственного предприятия безусловно должна быть возможность клонирования технических, технологических, организационных решений, и адаптации её к любым условиям и требованиям производства судостроительной продукции

Основные принципы организации интеллектуального судостроительного производства представлены на рисунке 3.

Принципиальные требования к интеллектуальной производственной системе



Рис. 3. Принципы организации интеллектуальной производственной системы

Принципы построения информационной системы обеспечения и поддержки производства судостроительной продукции должны использовать следующие программные и методические решения:

- все накопленные и используемые в системе данные обеспечения и поддержки управление производством, должны храниться в единой базе данных (БД), организованной средствами системы управления БД;
- ролевое управление доступом к данным и приложениям (изменение функций АРМ в соответствии с потребностями групп пользователей);
- технология клиент/сервер или трехзвенная архитектура с сервером приложений и Web-интерфейсом;

- модульная структура программного обеспечения;
- идентификация и протоколирование действий пользователя;
- графический интерфейс пользователя;
- открытая структура данных и протоколов обмена с внешними системами;
- современные средства конструирования приложений;
- единые требования к программному обеспечению рабочих мест. [1]

Основные функции интеллектуального (цифрового) производственного модуля, выполняемые в автоматическом режиме представлены на рисунке 4.

Функционал интеллектуального производственного модуля, требуемый к выполнению в автоматическом режиме



Рис. 4. Функции интеллектуального производственного модуля

Инновационное оборудование в совокупности с современными цифровыми производственными системами не только обеспечат предприятия большим выбором технических, технологических и конструкторских решений, обеспечат гибкость и экологичность производств, повысят конкурентоспособность выпускаемой продукции, но и создадут новые горизонты для развития науки и образования в нашей стране.

Целесообразным представляется деление на секцию общей подготовки, планирования и реализации производства и секцию АРМ.

В секции общей подготовки, планирования и реализации производства можно выделить модули – комплекты программ, обеспечивающие работу и осуществляющие контрольно-распределительные операции по соответствующим функциональным группам/ стадиям, сходя из основных этапов и структуры производственных циклов предприятия (рисунок 5):

Функциональные группы секции общей подготовки, планирования и реализации производства			
<p>Подготовка производства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — зарождение и формирование идеи будущего изделия; — формирование информации проектантом в формализованном стандартном электронном виде; — прием информации от проектанта в электронной форме; — управление документами и инженерной спецификацией изделия; — управление изменениями; — управление проектами; — управление технологическими данными; — создание и управление производственно-технологической сетевой модели строительства кораблей и судов. 	<p>Планирование производства:</p> <ul style="list-style-type: none"> — планирование стапельного производства (планирование верфи); — планирование мелкосерийного производства; — планирование потребностей в материалах и оборудовании; — планирование трудовых ресурсов. 	<p>Материальное снабжение:</p> <ul style="list-style-type: none"> — анализ потребностей в материалах и контрагентских поставках; — управление закупками; — отслеживание закупок; — приход; — контроль и учет расходования материалов, деталей и прочих составляющих (узлов) по нормам. 	
	<p>Экономический анализ:</p> <ul style="list-style-type: none"> — расчет плановой стоимости заказа в части материальных затрат; — анализ затрат на закупку товарно-материальных ценностей (ТМЦ) (на заказ, за период и т.п.); — анализ фактических материальных затрат в стоимостном выражении; — анализ запасов ТМЦ в стоимостном выражении. 	<p>Материальный учет:</p> <ul style="list-style-type: none"> — учет складских запасов в натуральном и денежном выражении; — учет материальных затрат основного производства по проектам, учетным заказам, планово-учетным единицам (ПУЕ). 	<p>Вспомогательные функции:</p> <ul style="list-style-type: none"> — ведение справочников; — управление персоналом; — контроль исполнительной дисциплины; — контроль информации в процессах конструкторско-технологической подготовки производства, планирования и снабжения.

Рис. 5. Типовой функциональный состав секции общей подготовки, планирования и реализации производства

К секции автоматизированных рабочих мест предъявлено требование обеспечения доступа к ресурсам общего информационного пространства посредством создания, обеспечения и поддержания специализированных автоматизированных рабочих мест, ориентированных на выполнение соответствующей функциональной нагрузке работников предприятия. Рабочее место

предоставит пользователю набор функций, определенных необходимостью выполнения конкретной задачи, который должен быть доступен для внесения корректировок административными модулями управляющей системы.

Типовая категоризация автоматизированных рабочих мест приведена на рисунке 6.



Рис. 6. Типовая категоризация автоматизированных рабочих мест

Также система должна содержать связующие модули:

Модули импорта данных из CAD систем

Модули взаимодействия/взаимоувязки с техническими средствами (обмен данными с терминалом данных штрих-кодов для проведения автоматизированной инвентаризации склада).

Модули обмена данными с существующими системами управления проектами, в т.ч. зарубежный софт («MS Project» и проч.) до тех пор, пока в ходе программы импортозамещения не будет получено и внедрено 100% отечественных продуктов.

Прочие/дополнительные модули системы (протоколирование изменений по всем важнейшим видам информации с возможностью просмотра результатов изменений, их даты и времени, авторов; подготовка данных по спецификациям из текстовых документов, позволяющий организовать массированный ввод информации по ранее построенным проектам большого числа неквалифицированных исполнителей).

Анализ тенденций развития мирового судостроения на протяжении двух десятилетий 21 века позволяет обозначить генеральные направления, формирующие вектор научной мысли в судостроительных технологиях, среди которых можно назвать:

1. Сальс-технологии для проектирования, строительства, ремонта и сервисного обслуживания судостроительной продукции;

2. Энергетическое замещение;
3. Универсальные обрабатывающие центры;
4. Цифровизация и роботизация производства и ремонта и сервисного обслуживания судостроительной продукции;
5. Инновационные сварочные технологии;
6. Интеллектуальные технологии в судостроении;
7. Дистанционные системы управления, оценки и измерения;
8. Мобильные ремонтные и сервисные технологии;
9. Инновационные материалы в судостроении.

Заключение

Справедливости ради, перечисленные направления актуальны для всех отраслей транспортного строительства, да и любой крупной промышленности.

Продвижение современных инновационных технологий в промышленность сегодня идёт в основном силами самих разработчиков и производителей.

Для повышения эффективности и ускорения достижения целей в процессе импортозамещения и импортоопережения разработчиков и производителей инновационной техники, интеллектуальных производственных технологий и вообще инновационных интеллектуальных производств, вне всякого сомнения, необходима поддержка от государства в решении финансовых, организационных и кадровых вопросов, в частности –

покровительство и прямое содействие системе подготовки профильных кадров.

К сожалению, объём научных публикаций современных российских учёных по рассматриваемой тематике, как и по прочим

областям науки, сегодня значительно меньше, нежели в период СССР и почти в 3 раза меньше, чем публикуемых работ зарубежных авторов, но ситуация выправляется усилиями министерств. цен, полученных в результате мониторинга.

Литература

1. Хмара Д.С., Фирсова А.В. Оценка потенциала создания гибкого цифрового производства на базе Онежского судостроительно-судоремонтного завода и возможности проецирования полученного опыта на другие предприятия отрасли. Экономика и управление. 2018;(4):51-60
2. Васильев А.А., Догадин А.В., Левшаков В.М., Невская А.Н., Технология и технологическое оборудование корпусообработывающих цехов судостроительных предприятий АО ЦТСС, СПб, 2016
3. Фирсова А.В., Хмара Д.С., Организация и управление предприятием: учебное пособие. СПбГМТУ, 2016. - 215 с.
4. Абрамов, А.В., Фирсова А.В., Хмара Д.С. Пути развития информационного пространства отрасли в целях экспертно-аналитического обеспечения разработки нормативно-методической документации. Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1 (43).Т.1 – С. 78-82.

References

1. Khmara D.S., Firsova A.V. Otsenka potentsiala sozdaniya gibkogo tsifrovogo proizvodstva na baze Onezhskogo sudostroitel'no-sudoremontnogo zavoda i vozmozhnosti proetsirovaniya poluchennogo opyta na drugie predpriyatiya otrasli [Assessment of the potential for creating flexible digital production on the basis of the Onega Shipbuilding and Ship Repair Plant and the possibility of projecting the experience gained to other enterprises in the industry]. Ekonomika i upravlenie. 2018;(4):51-60
2. Vasil'ev A.A., Dogadin A.V., Levshakov V.M., Nevskaya A.N., Tekhnologiya i tekhnologicheskoe oborudovanie korpusoobrabatyvayushchikh tsekhov sudostroitel'nykh predpriyatii [Technology and technological equipment of hull-processing workshops of shipbuilding enterprises]. AO TsTSS, SPb, 2016
3. Firsova A.V., Khmara D.S., Organizatsiya i upravlenie predpriyatiem: uchebnoe posobie [organization and management of the enterprise: textbook]. SPbGMTU, 2016. - 215 s.
4. Abramov, A.V., Firsova A.V., Khmara D.S. Puti razvitiya informatsionnogo prostranstva otrasli v tselyakh ekspertno-analiticheskogo obespecheniya razrabotki normativno-metodicheskoy dokumentatsii [The development of an information space industry with the aim of the expert-analytical support of development of normative-methodical documentation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – № 1 (43).Т.1 – s. 78-82.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анна Валентиновна Фирсова, доцент кафедры технологии судостроения, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: firsova-a-v@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Хмара, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики судостроительной промышленности, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dskh@corp.smtu.ru

Максим Алексеевич Шальнов, старший мастер участка, АО «Адмиралтейские верфи», 190121, Санкт-Петербург, наб. р. Фонтанки, д.203, e-mail: shalnov.ma@gmail.com

Anna V. Firsova, assistant professor of the department of of shipbuilding technology, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: firsova-a-v@mail.ru

Dmitriy S. Khmara, the assistant professor, Ph.D. (Econ), assistant professor of the department of economics of the shipbuilding industry, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: dskh@corp.smtu.ru

Maksim A. Shalnov, engineering job foreman, SC «Admiralty Shipyards», 203, Fontanka Emb., 190121, St. Petersburg, Russia, e-mail: shalnov.ma@gmail.com

Поступила в редакцию: 14.07.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 656

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.010>

Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов

А.И. Епихин¹ e-mail: bsmbeton@mail.ru, **М.А. Модина**¹ e-mail: marishamodina@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье проведено статистическое исследование, посвященное анализу аварийных ситуаций с судами мирового флота валовой вместимостью более 100 брутто-регистрационных тонн на море на основе ряда информационных источников, таких как отчеты регистратора Ллойда и статистика страхового общества Ллойда, национальных статистических данных, статистики международных морских организаций, статистики природоохранительных организаций и прочих источников. Были рассмотрены: распределение аварий по годам, отражены причины потери судов, отдельно выделена статистика по аварийности в полярных широтах. Полученные результаты показывают, что если безэкипажные суда будут введены в эксплуатацию в соответствии с уровнем автономности 5 (с развитием технологий искусственного интеллекта), мы сможем ожидать меньшего количества типичных морских аварий, связанных с «человеческим фактором», однако, нет никаких предпосылок ожидать, что последствия потенциальной аварии будут ниже наблюдаемых. В настоящее время оценка безопасности не учитывает такие немаловажные факторы, которые не возникали в судоходной отрасли в прошлом – такие как киберпиратство или кибертерроризм. А он может быть источником более разрушительных последствий, которые существенно повлияют на безопасность мореплавания автономных судов и восприятие их общественностью. Опираясь на результаты анализа статистических данных, и оперируя к научным изысканиям в этой области, перспектива замены грузовых судов торгового флота с экипажами на борту на полностью автономные суда достаточно проблематична на данном этапе технологий, но с каждым годом научные изыскания развивают эту отрасль, стараясь учитывать все недостатки и возможные риски.

Ключевые слова: авария, судовая электростанция, беспилотное судно, статистика, потери судов, полярные широты.

Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses

Alexey I. Epikhin¹ e-mail: bsmbeton@mail.ru, **Marina A. Modina**¹ e-mail: marishamodina@yandex.ru

¹ Admiral F. F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article presents a statistical study devoted to the analysis of emergencies with ships of the world fleet with a gross tonnage of more than 100 gross register tons at sea based on a number of information sources, such as Lloyd's Register reports and Lloyd's Insurance Society statistics, national statistics, statistics of international maritime organizations, statistics of environmental organizations and other sources. The following were considered: the distribution of accidents by year, the reasons for the loss of ships were reflected, statistics on accidents in polar latitudes were separately highlighted. The results obtained show that if unmanned vessels are put into operation in accordance with autonomy level 5 (with the development of artificial intelligence technologies), we can expect fewer typical maritime accidents associated with the "human factor", however, there is no reason to expect that the consequences of a potential accident will be lower than those observed. Currently, the safety assessment does not take into account such important factors that did not arise in the shipping industry in the past, such as cyber piracy or cyber terrorism. And it can be a source of more devastating consequences that will significantly affect the safety of navigation of autonomous vessels and their public perception. Based on the results of the analysis of statistical data, and operating on scientific research in this area, the prospect of replacing cargo ships of the merchant fleet with crews on board with fully autonomous vessels is quite problematic at this stage of technology, but every year scientific research develops this industry, trying to take into account all disadvantages and possible risks.

Keywords: accident, ship power plant, unmanned ship, statistics, ship losses, polar latitudes.

Введение

Автономные и дистанционно управляемые объекты успешно реализованы в различных транспортных отраслях, таких как автомобильная промышленность, подводные и воздушные суда, а также в военных технологиях. Вопросы безопасности этих современных разработок исследованы различными учеными. Однако, поскольку беспилотные торговые суда в настоящее время находятся на этапе разработки концепции и проектирования, определение уровней их безопасности однозначно неполно, ввиду отсутствия

статистических и эмпирических данных [1]. В статье сделана попытка интерпретировать отчеты мировых сообществ применительно к потенциальному внедрению безэкипажных судов в торговом флоте.

Материалы и методы

Основой для определения буксировочной мощности (EPS) являются графики Алферьев М.Я., Мадорский Г.С. [1]. Ими исследовались результаты испытаний моделей серия экспериментальное отделение остаточного сопротивления катамарана. Подсчет остаточного сопротивления катамаранных судов внутреннего плавания делают по диаграммам

коэффициента остаточного сопротивления, построенным по результатам буксировочных испытаний серийных моделей в опытовом бассейне по указанной выше методике. Для анализа аварийных ситуаций на море доступны ряд информационных источников, таких как отчеты регистра Ллойда и статистика страхового общества Ллойда [2-5], национальные статистические данные [4], статистика международных морских организаций [5], статистика природоохранных организаций и прочие.

Формат представления статистических и аналитических данных в различных источниках имеет существенные различия и разные подходы к трактовке причин и последствий аварий, поэтому в рамках исследования не представляется возможным провести прямой их анализ, и в полной мере выявить основные эксплуатационные факторы и их удельный вес в общем числе происшествий.

Однако исключить эти трудности применительно к торговому флоту, в какой-то степени, позволяет статистика Lloyd's List Intelligence Casualty Statistics, которая учитывает только суда валовой вместимостью более 100 брутто-регистрационных тонн и тем самым исключает из рассмотрения маломерные суда и инциденты с членами экипажей.

Результаты

По данным Lloyd's List Intelligence Casualty Statistics за декаду 2010-2019 годов во всем мире произошло 26071 аварийных происшествий. При этом абсолютное число аварийных происшествий возрастает, что объясняется увеличением количества судов. Однако количество погибших судов существенно снижается. Так в декаду 2000-2009 годов, погибло 1546 судов, а в декаду 2010-

2019 годов – 951 судно, то есть на 34,7% меньше. Это может быть обусловлено активным внедрением систем автоматизации судовых энергетических установок (СЭУ) и научно-техническими достижениями в области судостроения [8].

Существенно снизилось число погибших судов за последние 15 лет. (Рисунок 1).

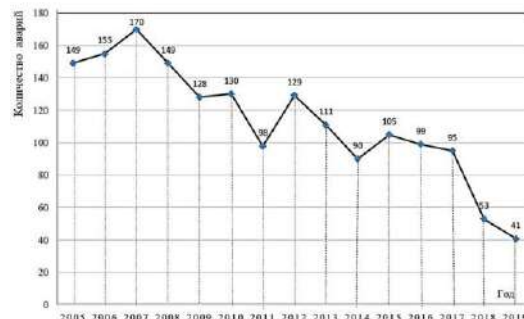


Рис. 1. Диаграмма распределения потерь судов по годам

Географически, за декаду 2010-2019 годов наибольший процент потери судов приходится на Южный Китай, Индокитай, Индонезию и Филиппины – 23,98%, далее следует Восточное Средиземноморье и Черное море – 14,4%, Япония, Корея и Северный Китай – 10,95%, Бискайский залив и Британские острова – 7,3%, Персидский залив – 5,15%, Западное африканское побережье – 4,12%, Западное Средиземноморье – 4%, Восточное африканское побережье – 3,15%, Бенгальский залив – 2,73%, Российская Арктика и Берингово море – 2,42%, остальные районы – 21,8%.

Общие потери по видам судов в 2010 - 2019 годах приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Общие потери судов в мире вместимостью более 100 брутто-регистрационных тонн в 2010 - 2019 годах (Источник: Lloyd's list Intelligence Casualty Statistics)

Вид судна/Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Итого
Сухогрузы	62	37	62	40	31	40	34	54	17	15	392
Рыболовные	22	14	12	13	15	16	10	8	12	9	131
Балкеры	11	14	11	15	5	13	5	7	2	1	84
Пассажирские	3	7	7	8	11	6	11	5	6	3	67
Буксиры	7	2	7	7	7	6	7	4	4	3	54
Химовозы	6	4	8	10	2	3	7	4	1		45
Контейнеровозы	5	3	7	4	4	5	5	3	2	1	39
Ролкеры	1	3	6	2	5	6	9		1	3	36
Вспомогательные	2	2	3	2	3	3	2	2	1		20
Танкеры	4	4	1		1			2	3		15
Землечерпалки	2	2	1		1	1	1	3	2		13
Баржи	1			3	1		3	1	2	1	12
Газовозы	1	1	1				1	1			5
Неизвестные				1		2	1			1	5
Другие	3	5	3	6	4	4	3	1		4	33
Всего	130	98	129	111	90	105	99	95	53	41	951

Как мы можем видеть из статистической подборки, снизилась доля сухогрузов – с 44,23% в 2000-2009 годы, до - 41,2%, в 2010-2019 годах, но они по-прежнему стоят на первом месте по числу потерь. Особенно заметно уменьшилась доля рыболовных судов - с 24,24% до 13,8%, но увеличилась доля пассажирских судов до 7% - что наиболее социально значимо, ввиду того, что пассажиры не являются прямыми участниками товаро-денежных отношений,

обеспечивающими безопасность мореплавания, каковым является экипаж.

На долю танкерного флота (нефтяные, химические и газовые) в целом приходится порядка 7% потерь, но учитывая их повышенную экологическую опасность, их доля представляется весьма значительной.

По данным Allianz global corporate & specialty (Safety and Shipping Review 2020) тремя основными

причинами общих потерь морских судов за последнее десятилетие, являются: затопление, контакт с грунтом и взрывы (пожары). На их долю приходится 85% всех потерь.

Виды (причины) потерь согласно [2] определяются по первоначальной причине аварии и исключают друг друга:

Столкновение - включает в себя суда, потерянные в результате удара или столкновения с другим судном, независимо от того, находятся ли они в пути, на якоре или пришвартованы к причалу.

Навал (контакт) - включает в себя суда, потерянные в результате удара о внешнее препятствие, исключая другое судно или морское дно. Препятствием могут быть стенка причала, а также буровые установки или платформы, как неподвижные, так и буксируемые.

Затопление - суда, затонувшие в результате непогоды, возникновения течи, разлома надвое и т. д., но не вследствие других причин, перечисленных в данном списке.

Пропавшие без вести - к ним относятся суда о которых не было получено никаких известий по истечении разумного периода времени и их судьба неизвестна.

Пожар / взрыв включает суда, потерянные в результате пожара и / или взрыва, если только это событие предшествовало другим событиям, перечисленным в данном списке. Но если пожар или взрыв возникли уже после столкновения с другим

судном или контакта с грунтом, то этот случай будет отнесен к столкновениям или контакту с грунтом соответственно.

Контакт с грунтом включает суда, погибшие в результате касания морского дна, песчаных отмелей или морского берега и т. д., а также вследствие запутывания в подводных обрывах сетей, швартовых концов и т.д.

Повреждение корпуса/отказ машин и механизмов включают в себя повреждение корпуса или отказ машин и механизмов, которые не могут быть отнесены к какой-либо другой категории.

В дальнейшем эта категория была разделена на две и под повреждением корпуса следует понимать его разрушение по внутренним причинам, например, при погрузочных работах.

Другое – эта категория включает военные потери (в том числе - потери, причиненные судам враждебными действиями) и потери, которые из-за отсутствия достаточных оснований не могут быть классифицированы.

Характер предоставляемых данных (Таблица 2), не позволяет оценить степень влияния эксплуатационных причин на данные происшествия, однако однозначно можно принять, что, как минимум, две категории (пожары и взрывы, а также отказы машин и механизмов) однозначно относятся к эксплуатационным факторам, приводящим к катастрофическим последствиям.

Таблица 2

Причины потери судов в мире за период 2010 – 2019 годов (Источник: Lloyd's list Intelligence Casualty Statistics)

Причина/Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Всего
Затопление	65	46	55	70	50	66	48	57	31	31	519
Посадка на мель	25	28	29	21	18	19	20	15	11	3	189
Пожар/взрыв	12	9	14	15	7	9	12	8	6	5	97
Отказы машин/механ	4	6	15	1	5	2	10	9	2		54
Столкновение судов	10	3	5	2	2	7	2	1	2	1	35
Повреждение корпуса	5	3	7	1	5	2	4	5	1	1	34
Смешанные	6	2	2	1	2		1				14
Навал			2		1						3
Пиратство	2	1									3
Пропали без вести	1						2				3
Всего	130	98	129	111	90	105	99	95	53	41	951

Из таблицы следует, что основными причинами потерь судов в 2010-2019 годах были: затопление (54,6%), контакт с грунтом (19,9%), пожары и взрывы (10,2%), отказы машин и механизмов (5,6%),

столкновения двух судов (3,6%), повреждение корпуса (3,5%).

Заметно возрос процент потери судов из-за затопления – с 49% в 2000-2009 годах, до 54,6% в 2010-2019 годах.

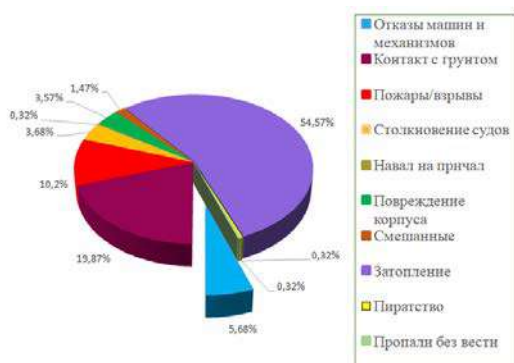


Рис. 2. Диаграмма по причинам потерь морских судов в мире за период 2010 - 2019 годов

Процент отказа машин и механизмов – 5,68%, среди других причин гибели судов, сравнительно невелик, однако в статистике общей аварийности отказ машин и механизмов занимает первое место - 37,1%, по данным за 2019 год.

Однако он увеличился более, чем в 3 раза по сравнению с 2000-2009 годами (1,65%). Но последняя цифра в данных AGCS за предыдущую декаду объединяет в один показатель отказы машин и механизмов и повреждение корпуса судна. Объединение этих причин аварий в 2010-2019 годах дает 9,25%. То есть реально по этим двум категориям в сумме имеется увеличение в 5,6 раза.

Таким образом, несмотря на то, что в количественном отношении число отказов механизмов и машин уменьшается, доля этой категории, среди причин потери судов имеет тенденцию к увеличению. Доля отказов машин и механизмов составляла в 2019 году - 37,1%.

Статистика аварийных ситуаций в полярных широтах

В полярных широтах потери судов сравнительно невелики, за декаду 2010-2019 годов было потеряно 14 судов, но значительно возрастает количество аварийных ситуаций из-за отказов машин и механизмов. (Таблица 2.3) [8-10].

Таблица 3

Причины аварий судов в арктических широтах в 2010 – 2019 годах (Источник: Lloyd’s list Intelligence Casualty Statistics)

Причина/Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Всего
Отказы машин/механ.	16	12	13	20	27	45	32	46	23	14	248
Контакт с грунтом	9	9	8	10	14	6	11	9	7	6	89
Пожар/взрыв	6	6	1	4	2	4	1	3	6	8	41
Столкновение судов	10	4	4	2		3	2	4	2	3	34
Навал	4	1	3	6	4	5	1	1		1	26
Повреждение корпуса	2	2	1	2	1	1	2		1	1	13
Затопление		3	1	1	2		1		1	1	10
Спорный случай							1				1
Смешанные	4	2	6	5	5	6	4	6	4	4	50
Всего	51	39	37	50	55	70	55	71	43	41	512

Причиной почти половины всех аварий в арктических широтах – 48,4% являются отказы машин и механизмов, затем следует контакт с грунтом – 17,4%, взрывы и пожары – 8% (Рисунок 3). На столкновение судов, навалы и повреждение корпуса приходится 14,3% причин всех аварий.

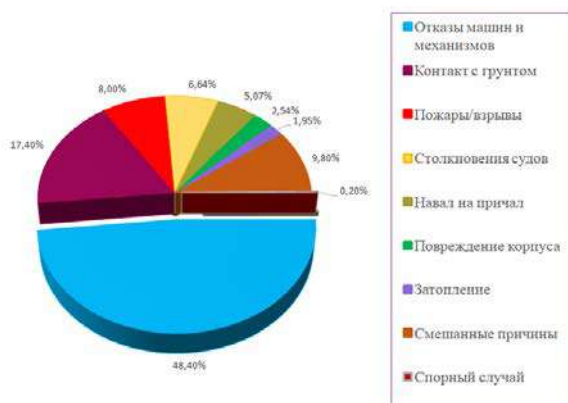


Рис. 3. Диаграмма по видам аварий на морских судах в арктических широтах за период 2010 – 2019 годов

По оценке издания AGSC на основе предъявленных финансовых претензий, 75% аварийных случаев связано с человеческой ошибкой, 18% аварий связано со случайными повреждениями, 1% - с природными явлениями, 1% связан с небрежным или недостаточным обслуживанием оборудования, 1% - с некачественными услугами береговыми службами и 5% - с другими причинами.

К человеческому фактору следует отнести крупную аварию круизного лайнера “Viking Sky” в марте 2019 года, при следовании из Тромса в Ставангер в Норвегии, когда во время шторма одновременно отключились все четыре двигателя (два MAN 9L32/44CR по 5040 kW и два MAN 12V32/44CR по 6720 kW). Причиной отключения послужил заниженный уровень смазочного масла в двигателях – вместо 68% - 70%, рекомендованных производителем. Уровень масла в двигателях находился на низшем допустимом пределе - от 40% до 28%, но в условиях качки масло стало неравномерно поступать, что вызвало срабатывание автоматики. В результате абсолютно исправное судно, с 1373 людьми на борту, потеряло ход и, получив многочисленные повреждения, было вынуждено встать на ремонт.

Рассуждения

Из доступной на данный момент литературы в области эксплуатации безэкипажных судов очевидно, что одной из основных проблем, связанных с эксплуатацией БЭС, является их безопасность. Основная аргументация в пользу их введения - повышение безопасности мореплавания. Ожидается, что это будет достигнуто за счет снижения частоты несчастных случаев на борту судов, связанных с «человеческим фактором», путем простого удаления экипажей. Но анализируя данные аварийности морского флота мы видим, что не только наличие «человеческого фактора» является определяющим – район плавания будет определять потенциальную вероятность аварии. Вероятнее всего на данный момент позитивное (по мере развития технологий искусственного интеллекта) удаление экипажа и перевод обслуживающего персонала в удаленный (береговой) центр управления с его параллельной переквалификацией. Опасности, которые будут присущи БЭС, еще предстоит идентифицировать. Кроме того, все еще неясна реакция беспилотного судна на возможные предаварийные ситуации, требующие непосредственного оперативного вмешательства человека. Стоит отметить, что в литературе отсутствуют научные исследования о влиянии безэкипажных судов на безопасность морских перевозок. Отдельного внимания требует танкерный флот ввиду чрезвычайной опасности для экологического благополучия.

Поэтому, для того чтобы восполнить этот пробел или, по крайней мере, уменьшить его, была предпринята попытка провести анализ статистических данных по авариям судов и

спроецировать его на unmanned (безэкипажный) флот, основанная на анализе более сотни отчетов мировых сообществ. Необходим дальнейший более глубокий анализ и оценка, произошла бы авария, если бы судно было автономным и, если бы она произошла - были бы ее последствия другими, если бы на борту не было никого, кто бы им противодействовал.

Заключение

Полученные результаты показывают, что если безэкипажные суда будут введены в эксплуатацию в соответствии с уровнем автономности 5 (с развитием технологий искусственного интеллекта), мы сможем ожидать меньшего количества типичных морских аварий, связанных с «человеческим фактором», однако нет никаких предпосылок ожидать, что последствия потенциальной аварии будут ниже наблюдаемых. Немаловажно отметить тот факт, что в настоящее время оценка безопасности не учитывает такие немаловажные факторы, которые не возникали в судоходной отрасли в прошлом - такие как киберпиратство или кибертерроризм. А он может быть источником более разрушительных последствий, которые существенно повлияют на безопасность мореплавания автономных судов и восприятие их общественностью.

Опираясь на результаты анализа статистических данных, и оперируя к научным изысканиям в этой области, перспектива замены грузовых судов торгового флота с экипажами на борту на полностью автономные суда достаточно проблематична на данном этапе технологий, но с каждым годом научные изыскания развивают эту отрасль, стараясь учитывать все недостатки и возможные риски.

Литература

1. Wróbel K., Montewka J. and Kujala P. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety Reliab. Eng. Syst. Saf. 2017, 165
2. Anon 2005 - 2013 Lloyd's Register Annual Report 2005 – 2013.
3. AGCS 2020 Safety and Shipping Review 2020 AGCS.
4. Finnish Annual Maritime Safety Review 2013 Finnish Transport Safety Agency (TraFi).
5. Anon 2011 – 2012 IMO reports and statistics.
6. Li Y. and Zheng J. Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory ISA Trans. 2020, pp.106.
7. Popov A. N., Kondratiev A. I. and Smirnov I. O. The algorithm for fast forecasting of the collision danger degree with ships and surface objects in the e-navigation area AGA 2018 - 19th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU).
8. Epikhin A. I. The basic causes of lng-vessels emergencies Bulletin of astrakhan state technical university. Series: marine technology and technology, 2016, p 7-12.
9. Epikhin A. I. The analysis of accident rate and consequences at implementation of shipping in the regions of the northern sea route (nsr). Ways of minimization of risks Operation of sea transport 2019, p 8-14.
10. Lupascu D. and Cristian Scurtu I Contributions to Improve Ships Safety and Construction Journal of Physics: Conference Series vol 1122, 2018.

References

1. Wróbel K., Montewka J. and Kujala P. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety Reliab. Eng. Syst. Saf. 2017, 165
2. Anon 2005 - 2013 Lloyd's Register Annual Report 2005 – 2013.
3. AGCS 2020 Safety and Shipping Review 2020 AGCS.
4. Finnish Annual Maritime Safety Review 2013 Finnish Transport Safety Agency (TraFi).
5. Anon 2011 – 2012 IMO reports and statistics.
6. Li Y. and Zheng J. Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory ISA Trans. 2020, pp.106.

7. Popov A. N., Kondratiev A. I. and Smirnov I. O. The algorithm for fast forecasting of the collision danger degree with ships and surface objects in the e-navigation area AGA 2018 - 19th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU).
8. Epikhin A. I. The basic causes of Ing-vessels emergencies Bulletin of astrakhan state technical university. Series: marine technology and technology, 2016, p 7-12.
9. Epikhin A. I. The analysis of accident rate and consequences at implementation of shipping in the regions of the northern sea route (nsr). Ways of minimization of risks Operation of sea transport 2019, p 8-14.
10. Lupascu D. and Cristian Scurtu I Contributions to Improve Ships Safety and Construction Journal of Physics: Conference Series vol 1122, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Иванович Епихин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судовых механических установок», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Alexey I Epikhin Ph.D (Eng), associate Professor, associate Professor of the Department "Operation of ship mechanical installations" Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 353918, Novorossiysk, Lenin Ave., 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Марина Александровна Модина, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Marina A. Modina, Ph.D (Eng), associate Professor, associate Professor of the Department of Navigation, Admiral F. F. Ushakov state Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918, e-mail: marishamodina@yandex.ru

Поступила в редакцию: 28.05.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 641.431.74-44

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.011>

Модифицированное топливо для снижения вредных выбросов двигателя внутреннего сгорания

И.И. Бочкарева¹, e-mail: family_i@mail.ru В.П. Зайцев¹, e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru
О.В. Рослякова², o.v.roslyakova@nsawt.ru

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ²Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В работе представлены экспериментальные результаты о влиянии воды в топливных системах – в виде водотопливной эмульсии и в растворенном состоянии в дизельном топливе. На основании экспериментальных данных установлено, что одна из причин снижения интенсивности образования оксидов азота является перевод работы дизеля с мазута на водотопливную эмульсию. При использовании эмульсии наблюдается сокращение объема активных зон – мест образования оксидов азота, а также уменьшение максимальных локальных температур газа. Были проведены исследования водотопливных систем, где молекулы воды находятся в растворенном состоянии в виде истинных растворов. Для повышения растворимости воды в дизельном топливе вводили модификаторы различной природы: высокомолекулярный спирт и соль четвертичного аммониевого основания. В результате испытаний, проведенных на двигателе 1Ч15/18, было установлено, что наличие растворенной воды в модифицированном топливе приводит к снижению токсичных компонентов CO и NO_x в выхлопных газах.

Ключевые слова: Водотопливная эмульсия, оксиды азота, окись углерода, соль четвертичного аммониевого основания, неводные растворы, дизельное топливо.

Modified fuel to reduce the harmful emissions of an internal combustion engine

Irina I. Bochkareva¹, e-mail: family_i@mail.ru Valerii P. Zaitsev¹, e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru
Oksana V. Roslyakova², o.v.roslyakova@nsawt.ru

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, ² Siberian State University of Water Transport

Abstract. This work presents experimental results of influence of water in heating systems – in a form of water-fuel emulsion and in the form of solution in diesel fuel. Based on experimental evidence established that one of the reasons for reducing the intensity of the education nitrogen oxides is the translation work of a diesel engine with vodotoplivnuju oil to emulsify. When using emulsions significantly reduced the volume of an active zone of the combustion chamber, where it is impossible the formation of NO_x. Studies have been carried out vodotoplivnyh systems where water molecules are dissolved State as true solutions. To increase the solubility of water in diesel fuel injected modifiers of different nature: high molecular weight alcohols and Quaternary ammonievogo salt Foundation. As a result of tests carried out on the engine 1Ch15/18 it was found that the presence of water dissolved in the modified fuel leads to reduced toxic components CO and NO_x in the exhaust.

Keywords: Water-fuel emulsion, nitrogen oxides, carbon oxide, quaternary ammonium salt, non-aqueous solutions, diesel fuel.

Введение

Практически весь современный транспорт в качестве топлива использует продукты переработки нефти, следовательно, по качественному составу выбросов он будет оказывать однотипное воздействие на природные комплексы. В совокупности все виды транспорта потребляют атмосферный кислород, участвуют в пополнении объема токсичных газов: оксидов углерода, азота и полициклических ароматических углеводородов. Существенное влияние на снижение выбросов в атмосферу оказывает вода в топливных системах [1, 2]. Исследование состояния воды в неводных растворах, в частности, в топливе, расширяет границы эффективного использования водно-топливных смесей, которые могут существовать в эмульсионном, мицеллярном состояниях и в виде истинных растворов.

Целью данной работы является исследование влияния воды в различных водно-топливных системах для снижения токсичных выбросов двигателя внутреннего сгорания

Результаты эксперимента и их обсуждение

Были проведены исследования влияния воды в топливных системах на выбросы одного из самых

токсичных компонентов выхлопных газов дизелей – оксидов азота (NO_x). Указанные исследования имеют большое значение для судов речного флота. В результате экспериментов, проводимых на двигателе 1Ч15/18, без значительного износа деталей ЦПГ (зазор между втулкой и юбкой поршня составлял 0,2 мм), и установлена одна из причин снижения интенсивности образования оксидов азота при переводе работы дизеля с мазута на водотопливную эмульсию (ВТЭ). Она определяется тем, что при использовании эмульсии существенно сокращается объем активной зоны камеры сгорания (КС), где возможно образование NO_x. Эти зоны характерны тем, что в них имеют место высокие значения концентраций кислорода и температур рабочего тела [1]. Основные технические данные экспериментальных установок дизелей 1Ч 15/18 и Ч10,5/12 приведены в таблице 1.

Принципиальные схемы лабораторных установок были примерно одинаковыми, их общий вид показан на рисунке 2.

ВТЭ готовилась отдельно на универсальном стенде для испытания топливных насосов.

Таблица 1

Основные технические данные экспериментальных установок дизелей 1Ч/15/18 и Ч10,5/12

Тип двигателя	Параметры						
	Агрегатная мощность	Частота вращения коленчатого вала об/мин	Диаметр цилиндра, мм	Ход поршня, мм	Степень сжатия	Удельный расход топлива г/(кВтч)	Способ смесеобразования
1Ч/15/18	18,5	1500	150	180	14-15	250	объемный
Ч10,5/12	22,5	1800	105	120	14-15	241	объемный

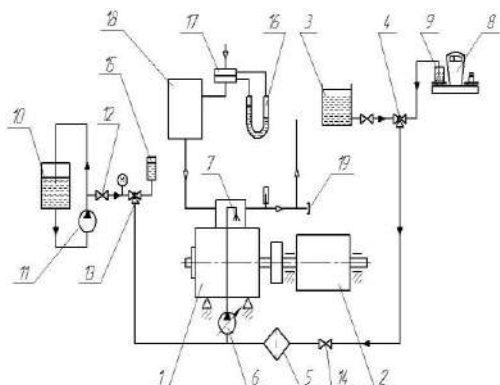


Рис. 1 Принципиальная схема установки:

1 – двигатель; 2 – нагрузочное устройство; 3 – расходный бак; 4 – трехходовой кран; 5 – топливный фильтр; 6 – ТНВД; 7 – форсунка; 8 – весы; 9 – емкость; 10 – бак; 11 – шестеренный насос; 12, 13 – кран; 15 – емкость; 16 – дифференциальный манометр; 17 – диафрагма; 18 – демпфер; 19 – узел для отбора проб.

По результатам экспериментов можно отметить, что с увеличением содержания воды во ВТЭ выбросы оксидов азота существенно сокращаются на всех режимах работы двигателя. На рисунке 2 в качестве примера, представлена

зависимость величины $\overline{NO_x} = \frac{NO_x}{NO_{x_0}} \cdot 100$, от

концентрации C_w воды во ВТЭ для двигателя 1Ч15/18. Здесь обозначено: NO_x , NO_{x_0} , текущая концентрация оксидов азота и та же величина при $C_w=0$. Опыты проводились на номинальном режиме. Содержание оксидов азота в отработанных газах определяли при помощи газоанализатора ПЭМ – 2М. Из рисунка 1 следует, что в данных условиях величина $\overline{NO_x}$ с ростом C_w практически линейно снижается.

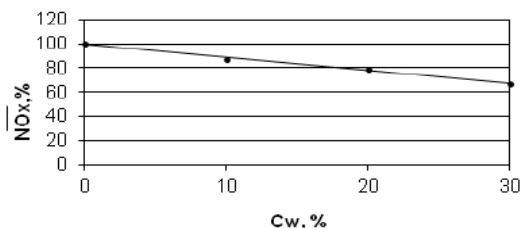


Рис. 2. Зависимость снижения выбросов $\overline{NO_x}$ оксидов азота от концентрации C_w воды во ВТЭ

Рисунок 3 иллюстрирует влияние присадки воды на удельный эффективный расход топлива. Из рисунка следует, что при номинальной величине $C_w \approx 20\%$ наблюдается снижение расхода топлива примерно на 10 %.

Таким образом, можно констатировать, что применение ВТЭ в двигателе 1Ч15/18 ведет к существенному снижению выбросов NO_x и повышению экономичности дизеля по расходу топлива.

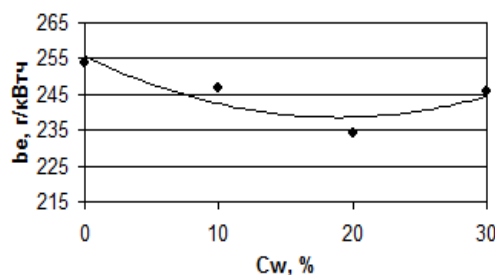


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от содержания воды во ВТЭ.

В данной области было проведено еще две серии экспериментов:

- с присадкой к водной фазе ВТЭ мочевины;
- с присадкой к воде аммиака.

Эксперимент был проведен на ВТЭ, приготовленной на основе водного раствора мочевины. Эмульсию получали на стенде. Состав данной эмульсии был следующий: 80 % – дизельное топливо, 19 % – водный раствор мочевины, 1 % – нефти (использовали для стабильности эмульсии). Концентрация мочевины в воде составляла 10 % по массе.

Опыты проводились на двигателе 1Ч15/18 по нагрузочной характеристике. Результаты испытаний приведены на рисунке 4.

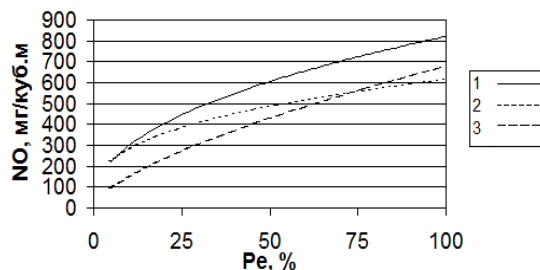


Рис. 4. Влияние присадки мочевины на концентрацию оксидов азота: 1 – работа на чистом дизельном топливе; 2 – работа на 20 % ВТЭ; 3 – 20 % ВТЭ с мочевиной.

Из рисунка 4 следует, что переход с чистого дизельного топлива на ВТЭ несколько уменьшает выбросы оксидов азота. При использовании мочевины, присаживаемой к водной фазе ВТЭ, на долевых нагрузках ($P_e < 50\%$ от $P_{ен}$, где $P_{ен}$ – номинальная нагрузка) имеет место заметное снижение выбросов NO. Наоборот, при $P_e > 50\%$ выбросы оксидов азота возрастают. Это говорит о том, что данный метод приемлем лишь для вспомогательных дизелей, которые большую часть времени работают на долевых нагрузках.

Удельные эффективные расходы топлива в процессе исследования на номинальном режиме работы дизеля оказались следующими (без учета теплоты сгорания мочевины):

- на чистом дизельном топливе $b_e = 347$ г/кВт.ч;
- на ВТЭ с $C_w = 20\%$ $b_e = 322$ г/кВт.ч;
- на ВТЭ с $C_w = 20\%$ с присадкой мочевины $b_e = 316$ г/кВт.ч;

Таким образом, можно констатировать, что применение водотопливных эмульсий при работе дизеля ведет к существенному снижению выбросов NO_x и повышению экономичности дизеля по расходу топлива. Экспериментально установлено, что добавка к водной фазе ВТЭ (с $c_w = 20\%$) мочевины заметно уменьшает выбросы оксидов азота на долевых нагрузках (по нагрузочной характеристике) по сравнению со случаем использования аналогичной чистой эмульсии. Наоборот, при мощности более 50 % от номинала экологические показатели дизеля ухудшаются по сравнению с исходным вариантом. Учитывая сказанное, данный метод можно рекомендовать для вспомогательных дизелей, которые, как правило, работают на долевых нагрузках. Добавка к водной фазе ВТЭ аммиака сокращает как выбросы азота, так и расход топлива. Для обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала система приготовления такой ВТЭ должна быть закрытой.

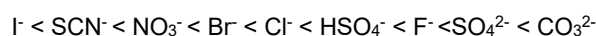
Однако к недостаткам этих топлив можно отнести малую устойчивость эмульсий, которая приводит к коалесценции капель воды с образованием водной фазы в дизельном топливе. Водно-топливные эмульсии также имеют невысокую дисперсность и значительную вязкость.

В связи с этим были исследованы водотопливные системы, где вода находится не в виде эмульсий, а в виде истинных растворов, которые представляют собой гомогенные системы и которые лишены вышеуказанных недостатков.

Для повышения растворимости воды в дизельном топливе вводят присадки различной природы, которые приводят к увеличению содержания воды в топливе. В качестве объекта исследования были выбраны высокомолекулярные спирты и соли четвертичных аммониевых оснований.

Исследование состояния воды в неводных растворах, в частности в топливе расширяет границы эффективного использования водотопливных смесей, которые могут существовать не только в эмульсионном, но и в мицеллярном состоянии, и в виде истинных растворов. В качестве объекта исследования были выбраны соли ЧАО. Указанные соли, по сравнению с солями аминов, значительно

лучше соэкстрагируют воду в органическую фазу в результате их гидратации [3]. Исследование солей ЧАО в неводных растворах показало увеличение растворимости воды в органической фазе в ряду анионов



Из проведенных исследований следует, что наибольший интерес представляет соль триалкилбензиламмонийкарбонат (ТАБАК), где радикал алкил равен $C_7 - C_9$. Соль, согласно, ряда анионов, является высокогидратируемой, при термическом разложении аниона CO_3^{2-} в отличие от других ионов, не вносит в состав выхлопных газов новых примесей и не образует угарный газ CO.

Соль ТАБАК получена путем анионообменных межфазных реакций из товарной соли триалкилбензиламмонийхлорид растворенной в дизельном топливе. Насыщение топлива водой проводили посредством смешения фаз при соотношении $V_{орг}: V_в = 1000:100$. После расслаивания фаз, водную фазу удаляли. Концентрации соли ТАБАК и воды в модифицированном топливе составляли 0,1 моль/л и 1,2 моль/л, соответственно. Испытания модифицированного топлива проводились на отсеке дизеля Ч10,5/12 по нагрузочной характеристике при частоте вращения коленчатого вала равном 1500 об/мин.

Для сравнения в качестве объекта исследования был выбран высокомолекулярный спирт - гексанол-1, который обладает высокой растворимостью в дизельном топливе. При этом концентрация октанола-1 в дизельном топливе составляла 0,5 моль./л, воды 0,04 моль/л. В зависимости от концентрации спирта молекулы воды могут существовать в неводных растворах от моногидратов до тетрагидратов спирта [4, 5].

В таблице 2 также приведены результаты исследования, где в качестве присадок использовались соль триалкилбензиламмонийкарбонат (ТАБАК) и гексанол-1.

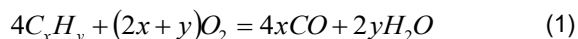
Таблица 2

Экологические показатели токсичных компонентов выхлопных газов при концентрации гексанола-1 в дизельном топливе 0,5 моль/л и ТАБАК – 0,1 моль/л

Модификатор	Снижение NO_x , %	Снижение CO, %
ГЕСАНОЛ-1	10	20
Соль ЧАО (ТАБАК)	28	40

В результате испытаний было установлено, что присутствие соли ТАБАК и растворенной воды в модифицированном дизельном топливе приводит к максимальному снижению токсичных компонентов выхлопных газов - по окиси углерода до 40%, по окисям азота до 28%. В случае высокомолекулярного спирта значительное снижение NO_x и CO наблюдается в области малых концентраций спирта, где молекулы воды существуют в виде моногидратов спирта.

Механизм действия солей ЧАО, высокомолекулярного спирта и воды, содержащихся в топливе, еще не изучен. Можно предположить, что процесс сгорания топлива протекает в две стадии



Присутствие воды в топливе способствует протеканию реакции (1, 2), и снижению газа CO в выхлопных газах двигателя. На этой реакции основано использование окиси углерода в качестве топлива [6], что, в конечном итоге, существенно снижает участие кислорода в окислении азота.

Заключение

На основании выполненных экспериментальных исследований можно отметить, что наличие воды в топливе служит катализатором дальнейшего окисления угарного газа до безвредного углекислого газа. Снижение концентрации оксидов азота обусловлено уменьшением количества кислорода, участвующего в окислении азота воздуха в камере двигателя внутреннего сгорания.

Таким образом, присутствие растворенной воды в дизельном топливе заметно улучшает экологические характеристики дизеля без его модификации и регулировок, что указывает на актуальность исследования топливных систем, насыщенных водой и водотопливных эмульсий.

Литература

1. Рослякова О.В. Снижение интенсивности образования оксидов азота в судовых дизелях: автореферат канд. дис. – НГАВТ. – Новосибирск, 2005. – 17 с.
2. Зайцев В.П., Юр Г.С., Усова Н.В., Сибриков Д.А., Карабанцев А.В., Карпушин М.Н. Перспективы использования солей четвертичных аммониевых оснований для улучшения экологических характеристик двигателя внутреннего сгорания // Труды 3-й Междун. науч.-техн. конф. «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт. – Омск: Иртышский филиал ФГОУ ВПО «НГАВТ», 2007. – С. 261 – 262.
3. Зайцев В.П., Усова Н.В. Исследование состояния воды в неводных растворах солей четвертичных аммониевых оснований применительно к топливным системам // Науч. пробл. трансп. Сибири и Дальнего Востока. -2005. - № 1-2. С. 109 – 113.
4. Иванов И.М., Зайцев В.П. Гидратация и сольватация солей четвертичных аммониевых оснований в экстракционных системах // Известия СО РАН. Сер. хим. наук. -1978. -№4. –Вып. 2. –С. 18 – 26.
5. Иванов И.М., Зайцев В.П. ИК-спектроскопическое исследование гидратации солей четвертичных аммониевых оснований в неводных растворах // Известия СО РАН. Сер. хим. наук. -1981. -№4. –Вып. 6. – С. 58 – 66.
6. Неницеску К. Общая химия – М.: Мир., 1968. – 816 с.

References

1. Roslyakova O.V. Snizheniye intensivnosti obrazovaniya oksidov azota v sudovykh dizelyakh [Reducing the intensity of nitrous oxide formation in marine diesels]: avtoreferat kand. dis. Novosibirsk: Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2005. 17 p.
2. Zaitsev V.P., Yur G.S., Usova N.V., Sibrikov D.F., Karabantsev F.V., Karpushin M.N. Perspektivy ispol'zovaniya soley chetvertichnykh ammoniyevykh osnovaniy dlya uluchsheniya ekologicheskikh kharakteristik vigatelya vnutrennego sgoraniya [Prospects for the use of quaternary ammonium salts to improve the environmental characteristic of an internal combustion engine]. Trudy 3-y Mezhdun. nauch.-tekhn. konf. «Energetika, ekologiya, energosberezheniye, transport. Omsk: Irtyshskiy filial FGOU VPO «NGAVT». Publ. 2007. pp. 261-262
3. Zaitsev V.P., Usova N.V. Issledovaniye sostoyaniya vody v nevodnykh rastvorakh soley chetvertichnykh ammoniyevykh osnovaniy primenitel'no k toplivnym sistemam []. Nauch. probl. transp. Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2005. No. 1-2. pp. 109-113
4. Ivanov I.M, Zaitsev V.P. Gidratatsiya i sol'vatatsiya soley chetvertichnykh ammoniyevykh osnovaniy v ekstraktsionnykh sistemakh [Investigation of water in non-aqueous solutions of quaternary ammonium salts as applied to fuel systems]. Izvestiya SO RAN. Ser. khim. nauk. 1978. No 4. pp. 18-26
5. Ivanov I.M, Zaitsev V.P. IK-spektroskopicheskoye issledovaniye gidratatsii soley chetvertichnykh ammoniyevykh osnovaniy v nevodnykh rastvorakh [Hydration and Solvation of salts of quaternary ammonium bases in extraction systems]. Izvestiya SO RAN. Ser. khim. nauk. 1981. No. 4. pp. 58-66
6. Nenicescu K. Obshchaya khimiya [General Chemistry]. M: Mir, 1968. -816 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ирина Ивановна Бочкарева, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии и природопользования Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, e-mail: family_i@mail.ru

Irina I. Bochkareva, Ph.D (Bio), assistant professor of Department of ecology and nature management, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo 10 St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, e-mail: family_i@mail.ru

Валерий Павлович Зайцев, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры экологии и природопользования, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru

Оксана Вячеславовна Рослякова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности, Сибирский государственный университет водного транспорта 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: o.v.roslyakova@nsawt.ru

Valerii P. Zaitsev, the professor, Dr.Sci. (Chem) in Chemistry, the professor of department of ecology and nature management, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotnogo 10 St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru

Oksana V. Roslyakova, Ph.D. (Eng), assistant professor of Department of technosphere safety Siberian State University of Water Transport Schetinkina, 33, St, Novosibirsk, 630099, Russian Federation, e-mail: o.v.roslyakova@nsawt.ru

Поступила в редакцию: 04.03.2021

Прината к публикации: 15.08.2021

УДК 629.5.015, УДК 629.12.001.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.012>

Некоторые аспекты реализации технологий управления энергетическими установками с учетом концепции автономных судов

А.И. Епихин¹ e-mail: bsmbeton@mail.ru, А.В. Игнатенко¹ e-mail: iscander@hotmail.co.uk

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Обеспечение удаленного управления судовой энергетической установкой автономного судна, контроль параметров процессов и оценка их технического состояния с использованием искусственных нейронных сетей для морского автономного надводного судна (МАНС). Создание цифровых двойников и прогнозирование технического состояния, моделирование сценариев изменения технического состояния судовых технических средств. Современные тенденции и перспективы научных изысканий в области управления судовыми энергетическими установками и системами, их обслуживающими, применительно к концепции автономного судна и безэкипажного (беспилотного) судоходства, а также выполнения ужесточающихся требований международного морского законодательства по предотвращению загрязнения атмосферы с судов. Использование альтернативных топлив и переход на электроснабжение с берега при стоянке таких судов в портах, на оборудованных рейдовых стоянках, а также использование «чистой электроэнергии» для электроснабжения объектов водного транспорта и шельфовой инфраструктуры.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, энергоэффективность, газообразное топливо, электронное управление, безэкипажное судоходство, интегрированные системы управления, нечетко-нейронная сеть, цифровые двойники.

Some aspects of the implementation of power plant management technologies taking into account the concept of autonomous vessels

Aleksey I. Epikhin¹ e-mail: bsmbeton@mail.ru, Aleksandr V. Ignatenko¹ e-mail: iscander@hotmail.co.uk

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia

Abstract. Providing remote control of the ship's power plant of an autonomous ship, monitoring process parameters and assessing their technical condition using artificial neuro-fuzzy networks for a marine autonomous surface vessel (MANS). Creation of digital twins and forecasting of the technical condition, modeling of scenarios of changes in the technical condition of ship technical equipment. Modern trends and prospects of ship power plants and their elements in relation to the concept of an autonomous vessel and crewless (pilotless) navigation, incorporating meeting the potential newer requirements / restrictions of international maritime legislation regarding airborne pollutions from ships. The use of alternative fuels and the alternative to marine power technology from the shore when such vessels are moored in ports, at equipped roadsteads, as well as the use of "clean electricity" to supply power to marine transport facilities and offshore infrastructure.

Keywords: marine power plants, energy-efficiency, ship's fuels, electronic control, crewless navigation, autonomous shipping, integrated automation systems, fuzzy-neural network

При переходе к концепции безэкипажного судоходства с учетом приоритетов и с точки зрения управления СЭУ одной из наиболее ответственных областей является построение адекватной интегрированной системы управления (ИСУ, англ. – IAS, IAMCS: Integrated Automation, Monitoring and Control System) судовой энергетической установки (СЭУ), объединяющей как системы управления главными и вспомогательными энергетическими установками, так и остальными судовыми техническими средствами (СТС) судна. Основным направлением исследований в этой области является создание способа гармонизации систем управления процессами энергетических установок и навигационных систем (систем маневрирования), который бы обеспечивал требуемый уровень безопасной и эффективной (safety and efficiency) уровень эксплуатацию судна, включающую улучшение эксплуатационных характеристик оборудования, а также уменьшение числа обслуживающего персонала при высокой надежности функционирования [1, 4].

Из доступной на данный момент литературы в области безэкипажного судоходства очевидно, что одной из основных проблем, связанных с эксплуатацией БЭС, является их безопасность. Основная аргументация в пользу их введения - повышение безопасности мореплавания. Ожидается, что это будет достигнуто за счет снижения частоты несчастных случаев на борту судов, связанных с «человеческим фактором», путем простого удаления экипажей. Однако на самом деле экипаж не будет полностью удален, а скорее переведен в удаленный центр управления. Это может создать опасности, которые еще предстоит идентифицировать. Кроме того, все еще неясна реакция беспилотного судна на возможные аварии. Стоит отметить, что в литературе отсутствуют научные исследования о влиянии безэкипажных судов на безопасность морских перевозок. Отдельного внимания требует танкерный флот. Возможные взаимосвязи опасностей, ожидающих БЭС представлены на рисунке 1 в виде модульной структуры.



Рис. 1 Модульная структура взаимосвязей аварийности безэкипажных судов

Чтобы обеспечить судну достаточный уровень эксплуатационной надежности в целях обеспечения безопасности мореплавания на борту должны быть реализованы следующие технические решения:

- резервирование мощностей;
- защищенные линии связи (протоколы передачи данных);
- дополнительные датчики внешних возмущений;
- специально разработанные алгоритмы функционирования судовых систем с использованием искусственного интеллекта и нейросетевых технологий.

В настоящее время существует множество средств, методов и систем получения информации о параметрах работы судовых технических средств (СТС) путём контроля и диагностики [5-8]. Вместе с тем необходима разработка новых комплексных технических решений безопасного и эффективного управления, мониторинга и диагностики путем внедрения в этот процесс технологий, основанных на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС).

Зачастую для осуществления процесса управления и диагностики СТС используются одни и те же модели, методы и технологии. Но их реализация выражается в совершенно различных аппаратных средствах, отсутствии возможности централизации и интеграции в единую систему мониторинга и управления судна. Создание интеллектуальных систем мониторинга, диагностики и управления СЭУ и синтез интегрированных систем комплексного управления позволит сделать еще один шаг вперед на пути к созданию автономных судов.

Принимая во внимание постоянное ужесточение экологических норм, проблемы экономии ресурсов, а также проблемы безопасности морского транспорта, связанные с отказоустойчивостью СТС и особенно систем их управления, можно сказать, что задача интеллектуального управления судном с учетом диагностики состояния его механизмов и систем

является актуальной.

Разработка интеллектуальных систем с использованием нейро-нечетких сетей (ННС) позволяет оптимизировать и упростить процесс управления [1,5]. Морское судно представляет собой сложную динамическую систему, включающую СТС, которые функционируют в различных режимах, присутствует взаимозависимость их работы, существенно влияющих на выходные характеристики. Существующие системы мониторинга и управления в большинстве своем децентрализованы, они не учитывают влияние режима эксплуатации СТС на мореходные качества судна. Это негативным образом отражается на качестве работы алгоритма и объекта управления (ОУ) в целом при переходе к БЭС, тем самым снижая безопасность мореплавания в частности, так и делая технически невозможным эксплуатировать автономное судно.

Система «СЭУ-СУДНО» является нелинейной нестационарной стохастической системой. Многие процессы, проходящие в ней, не поддаются математическому анализу и описанию, носят случайный характер, поэтому даже самые совершенные системы управления не способны обеспечить адекватные управляющие воздействия в условиях БЭС, тем самым, не удовлетворяя требованиям обеспечения безопасности.

СТС в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействиям вибрации, ударных нагрузок, влаги, соли, изменениям температуры окружающей среды в широком диапазоне и другим внешним факторам. Такие воздействия ускоряют процесс ухудшения технического состояния их деталей и узлов, тем самым увеличивая вероятность наступления аварийной ситуации. В результате параметры их работы существенно изменяются. Система управления получает лишь ограниченное количество данных о состоянии ОУ, не анализируя их ввиду отсутствия прогностической подсистемы, поэтому просто не способна адекватно реагировать на все вышеперечисленные изменения. Надежность

работы СТС падает, что недопустимо во время автономного плавания судов.

Существующие системы управления не способны заблаговременно выявить предаварийную ситуацию, предупредить о ней, рассчитать время до аварии, локализовать неисправность, приводящую к поломке, либо скорректировать работу двигателя для минимизации или исключения аварийной ситуации. Поэтому необходим постоянный контроль состояния СТС со стороны оператора, например оперативный перевод двигателя в другой режим работы либо полный его останов при возникновении какой-либо неисправности. Все это не позволяет исключить человеческий фактор из возможных причин аварий на судах.

В настоящее время все, даже новейшие судовые системы управления, в том числе на базе ННС, не используют мониторинг и диагностику объекта в должной мере и, как следствие, не способны выявлять, устранять и прогнозировать ресурс, дефекты и неисправности СТС. Такие системы снабжены лишь автоматической защитой от аварий, тем самым осуществляется констатация факта, без возможности заблаговременно локализовать зарождающуюся неисправность. Это является существенным недостатком - потенциал современных систем управления на базе искусственного интеллекта не используется в полной мере. Поставленная задача выполнима для данных систем, требуя внедрения технологий искусственного интеллекта в процессы мониторинга, диагностики и управления СЭУ и последующему синтезу интегрированных систем комплексного управления автономным судном.

Комплексная система мониторинга, диагностики и управления имеет возможность непрерывной реализации ряда основных функций, таких как:

- измерение, при этом предполагается возможность реализации как прямого измерения контролируемых параметров, так и получения сведений о значениях параметров по косвенным показателям;
- контроль, т.е. анализ соответствия значения контролируемого или измеряемого параметра соответствующей области допустимых или недопустимых значений;
- мониторинг, т.е. реализация расширенных контрольных функций, в т.ч. сравнительный анализ с характерными ретроспективными значениями показателей либо с аналогичной динамикой изменения соответствующих значений показателей по архивным данным;
- диагностика, т.е. обнаружение, идентификация и распознавание неблагоприятных сочетаний параметров, отказов или предаварийных ситуаций;
- прогнозирование развития аварийной ситуации;
- предотвращение аварийных ситуаций.

Функционирование такой системы предполагает непрерывный мониторинг контролируемых технологических и функциональных параметров всех основных СТС, при этом ввод данных в систему осуществляется посредством специального интерфейсного модуля, обеспечивающего согласование параметров сигналов измерительных преобразователей и датчиков в формат,

соответствующий входным характеристикам аппаратной части. На следующем этапе используется модуль, определяющий наличие отклонений от штатных режимов работы или заданных диапазонов параметров, соответствующих безопасной эксплуатации СТС, после чего полученная информация проверяется на соответствие стандартным алгоритмам действий, при соответствии которым рекомендуемое решение выбирается из базы знаний. При несоответствии выявленной ситуации стандартному перечню событий, информация передается в интеллектуальный модуль, где выполняется обработка данных с целью поиска оптимальных решений. После определения вариантов предлагаемых решений логический модуль анализирует различные варианты и формулирует управляющее воздействие с параллельным информированием удаленного оператора в виде соответствующих рекомендаций.

Принцип функционирования системы предполагает последовательную отработку 5 этапов:

1. На первом этапе производится накопление актуальных данных о состоянии системы и параметрах внешней среды, а также обработка собранных данных и формулирование прогноза состояния исследуемой систем на некоторый период вперед. На данном этапе производится дискретная оценка текущего и перспективного состояния системы по критерию удовлетворительности или неудовлетворительности.

2. На втором этапе, при получении сведений о неудовлетворительности текущего или прогнозного состояния, формулируются сведения о необходимом состоянии системы.

3. На третьем этапе производится поиск способов перевода системы в требуемое состояние, при этом формируется по возможности избыточное множество вариантов решений и на основании анализа данного множества определяются допустимые варианты.

4. На четвертом этапе производится анализ допустимых вариантов с последующим выбором наилучшего.

5. На пятом этапе производится реализация принятого решения.

Система автоматического управления БЭС имеет возможность непрерывной реализации ряда основных функций, таких как:

- измерение, при этом предполагается возможность реализации как прямого измерения контролируемых параметров, так и получения сведений о значениях параметров по косвенным показателям;
- контроль, т.е. анализ соответствия значения контролируемого или измеряемого параметра соответствующей области допустимых или недопустимых значений;
- мониторинг, т.е. реализация расширенных контрольных функций, в т.ч. сравнительный анализ с характерными ретроспективными значениями показателей либо с аналогичной динамикой изменения соответствующих значений показателей по архивным данным;

- диагностика, т.е. обнаружение, идентификация и распознавание неблагоприятных сочетаний параметров, отказов или предаварийных ситуаций;

- прогнозирование развития аварийной ситуации;
- предотвращение аварийных ситуаций.



Рис.2 Схема построения комплексного алгоритма анализа развития и предотвращения неблагоприятных ситуаций

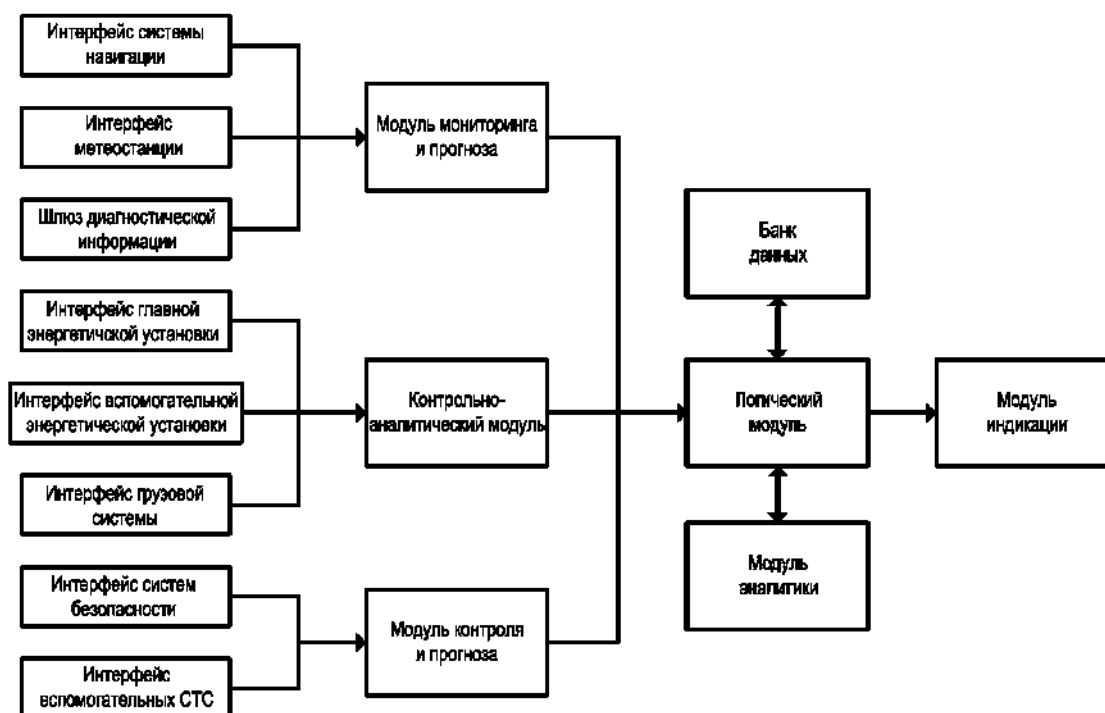


Рис.3 Модульная структура системы автоматического управления безэкипажных судов с интерфейсом удаленного оператора

Для сбора оперативной информации с судовых технических средств целесообразно использовать один из наиболее распространенных протоколов, использующихся в промышленной автоматизации и централизации - это Modbus с возможностью использования различных видов последовательных линий связи - RS-485, RS-422, RS-232 и пр., а также

сетей TCP/IP (Modbus TCP), что позволит реализовать универсальность применения такой системы. Также Modbus имеет большое количество промышленно производимых датчиков, исполнительных устройств, модулей обработки и нормализации сигналов, конверторов протоколов и прочих устройств, позволяющих обеспечить

сопряжение с различными типами средств автоматизации судовых систем.

Функционирование системы заключается в выявлении неблагоприятных условий, способствующих развитию опасных и аварийных ситуаций, и выработке соответствующих управляющих воздействий, направленных на принятие превентивных мер по их предотвращению. Для этого используется ряд алгоритмов комплексного мониторинга взаимной работы функционально взаимосвязанного оборудования. К важным аналитическим данным относится ряд комплексных показателей, характеризующихся множеством разнородных факторов, отражающих как внутренние, так и внешние возмущения системы.

В целях повышения достоверности прогнозирования параметров СТС, в модуле системе также осуществляется параллельное математическое моделирование (по принципу «black box») режимов работы всех задействованных в системе СТС в прогнозе на различные сценарии развития контролируемых параметров, что позволяет спрогнозировать возможность развития опасных и аварийных ситуаций задолго до их фактического зарождения. Это позволит заблаговременно задействовать необходимые и целесообразные меры безопасности или активировать такие противоаварийные режимы функционирования СТС или решения по навигации, которые позволят минимизировать степень риска для судна, окружающей среды или объектов морской инфраструктуры.

Такие меры могут представлять собой изменение маршрута, изменение режимов работы силовых установок, превентивную активацию вспомогательных систем, таких как система повторного сжигания груза, система предотвращения обледенения и пр., а также выполнять оперативное техническое обслуживание СТС с целью повышения их эксплуатационной надежности или восстановления их работоспособности.

Физические и электрические параметры технических средств сбора и передачи данных, работающих в стандарте Modbus, в случае использования специализированных модулей усиления и ретрансляции сигналов, позволяют обеспечивать надежную передачу данных на расстояния в несколько километров при сложных условиях внешней среды, что соответствует габаритным параметрам современных и перспективных морских судов. Количество устройств в судовой системе централизации ограничивается необходимостью объединения средств сбора информации в группы до 247 конечных точек, с использованием для каждой группы собственного Master-модуля.

В плане универсальности и гибкости системы, представляется наиболее целесообразным для построения имитационной модели использовать инструментарий программной среды Matlab/Simulink.

Для прочих судовых технических средств процедуры сбора, накопления, передачи и централизации диагностических и функциональных параметров могут быть представлены в виде пропорциональных аналоговых или цифровых электрических сигналов от соответствующих блоков,

датчиков или измерительных преобразователей, пригодных для конвертирования в необходимый протокол передачи и сбора данных. Для протокола Modbus RTU используется последовательный master/slave интерфейс, при котором каждому СТС выделяется отдельный концентратор с соответствующей адресацией.

Головной модуль сбора данных производит последовательный опрос каждого концентратора судовой контрольно-диагностической системы, периодичность которого определяется количеством концентраторов и частотой контроллера шины Modbus. Достаточно использовать минимальную скорость - 9600 бит/с, 8-разрядные данные, таймаут запроса 0,01 с и одноярусную сеть - максимум 254 концентратора. При таких параметрах частота обновления информации по всем СТС составит порядка 1-2 сек, что в полной мере соответствует эксплуатационным требованиям, предъявляемым к системе.

Синтез интегрированных систем управления, диагностирования и мониторинга:

- благоприятно отразится на экономических и экологических показателях эксплуатации автономного судна;

- уменьшит затраты на привлечение дополнительного экспертного персонала, ремонтное обслуживание и время простоя оборудования, а значит, и судна в ремонте;

- обеспечит безотказную, долговременную и оптимальную работу;

- поможет избежать непредвиденных и аварийных ситуаций;

- уменьшит информационную нагрузку на удаленного оператора за счет уменьшения количества обращений к состоянию и параметрам подсистемы диагностики;

- снизит возможные ложные аварийные ситуации;

- позволит создать и пополнять базу знаний для однотипных судов достоверными данными с последующим совершенствованием и универсализацией методов управления и диагностирования и повышением качества управления на основе этих знаний;

- позволит получать данные о состоянии объекта управления в режиме реального времени, исключая его остановку и (или) необходимость простоя в порту.

Рассмотренная комплексная система управления автономным судном на базе ННС, по нашему мнению, позволит объединить в себе достоинства существующих систем и избежать их основных недостатков. Синтез интегрированных систем управления, диагностирования и мониторинга позволит перейти на новый, более эффективный и экономически выгодный этап эксплуатации. Тенденция к внедрению безэкипажного судоходства (БЭС) позволит обеспечить спрос на интегрированные системы управления с учетом диагностирования при переходе от модели к готовой продукции.

В долгосрочной перспективе существующих стратегий до 2050 и 2100 годов одним из основных векторов указывается «декарбонизация» морской энергетики и четко просматривается постепенный

отказ от массового использования углеводородного топлива

В концепцию снижения выбросов с судов гармонично вписалась технология альтернативного питания с берега (АПБ, англ. – AMP, Alternative Maritime Power) [9]. С середины первого десятилетия 2000-х началось продвижение и внедрение в отдельных портах технологии питания судов с берега во время стоянки – с сохранением полной работоспособности комплекса СТС и энергообеспечения всех технологических процессов, собственных судну в соответствии с его назначением. Получив старт в портах западного побережья США, технология АПБ распространяется далее – в Юго-Восточную Азию и Европу: в концепции развития европейских портов закреплено положение об обеспечении высоковольтного питания с берега во всех европейских портах к концу 2025. Отдельно необходимо отметить тот факт, что электроэнергию, используемую для систем АПБ предполагается получать, в основном, «чистым способом» без применения углеводородного топлива: от гидроэлектростанций, ветрогенераторов, из других альтернативных источников.

Технологии АПБ и их практическая реализация рядом ведущих изготовителей оборудования предполагают в перспективе возможность подготовки и подключения АПБ и автоматизированного перехода на береговое электроснабжение без непосредственного участия экипажа или персонала береговых служб, что сочетается с концепцией автономного судна, энергетическая установка которого управляется с применением ННС. В перспективе возможно создание оборудованных рейдовых стоянок и распространение технологии АПБ при электроснабжении с берега на объекты шельфовой инфраструктуры.

В эксплуатации энергетических установок морских судов и объектов водного транспорта определяющими являются понятия безопасности и эффективности. Плановая дата (19 мая 2005) вступления в силу приложения VI к конвенции

МАРПОЛ-73/78 по предотвращению загрязнений атмосферы с судов послужила в начале 1990-х годов стимулом к разработке новых систем управления судовыми дизельными двигателями, отвечающими требованиям по снижению выбросов окислов азота. Так в отрасль пришли судовые малооборотные двигатели с электронным управлением (МОД с ЭУ) [2]. С момента вступления приложения VI в силу постепенно ужесточались нормы по предотвращению загрязнения атмосферы окислами азота (NO_x) и серы (SO_x), а также парниковыми газами (англ. – greenhouse gases – GHG). Ключевыми этапами для ограничений выбросов NO_x явилось введение норм IMO Tier I, II и III – в 2000, 2011 и 2016 годах соответственно, а для SO_x – IMO Global Sulphur Cap – 01/01/2020.

С точки зрения технологии СЭУ основные пути выполнения этих требований – использование новых видов топлив и дополнение конструкции судовых дизельных двигателей новыми узлами, назначением которых является снижение указанных выбросов – системы селективного каталитического восстановления (СКВ), рециркуляции выпускных газов (РВГ), скрубберы [2].

Альтернативные виды топлива такие как сжиженный природный газ (СПГ), сжиженный нефтяной газ и метанол, аммиак, аккумуляторные батареи, биотопливо (гидроочищенное растительное масло, hydrotreated vegetable oil HVO), водород. Сравнительные характеристики [3] для этих видов топлива показаны на рисунке 4, включая:

- готовность технических решений по их применению на судах;
- доступность топлива;
- инфраструктуру по доставке топлива к портам и бункеровочным базам;
- безопасность использования;
- капитальные затраты судовладельцев;
- стоимость;
- объемная плотность энергии (энергия на единицу объема).



Рис.4 Сравнительные характеристики альтернативных видов судовых топлив

Из сравнения по основным показателям можно сделать вывод о том, что сжиженный природный газ (СПГ), как альтернативное топливо, имеет ряд существенных преимуществ и лишь по двум показателям – инфраструктура (бункеровочные базы) и капитальные затраты на оборудование – средние значения. В настоящий момент инфраструктура бункеровочных баз динамично

развивается и в ближайшие 5 – 10 лет существенно большее количество портов сможет обеспечить доступность СПГ судам.

В таблице 1 приведен комплекс мер, направленных на повышение энергоэффективности на морском транспорте с указанием групп / пакетных решений и временных интервалов реализации.

Таблица 1

Пакетные решения по повышению энергоэффективности на морском транспорте

Группа мер	Реализация	Пояснения
Начальный (отправная точка)	до 2015	Для судов, построенных до 2015 года, стандартные меры по поддержанию энергоэффективности судна включают: периодическую очистку корпуса, полировку гребных винтов, оптимизацию параметров главных и вспомогательных двигателей и грузовых систем.
Базовый	2015-2020	Для судов, построенных в этот период, повышение энергоэффективности достигается за счет улучшения гидроаэродинамических свойств корпусов, гребных винтов и рулей, а также повышения эффективности механизмов с использованием электропривода с полупроводниковыми преобразователями частоты, а также валогенераторных установок.
Улучшенный	2020-2025	Ожидаемое повышение энергоэффективности связано с улучшением систем утилизации энергии потерь тепловых двигателей, оптимизацией носовых обводов корпуса судна, улучшением характеристик паропроизводящих / котельных установок, а также оптимизацией скоростных режимов судовых тепловых двигателей.
Продвинутый	2025-2030	включая использование парусов, солнечных батарей, систем глубокой утилизации энергии потерь тепловых двигателей, а также разработка конструкций судов со снижением минимально необходимого балласта
Передовой	2030 и далее	Меры, разрабатываемые на перспективу за пределами десятилетнего периода: применение передовых технологий, включая использование цифровых двойников судов и СЭУ, а также ветровой энергии на борту судов.

Все указанные процессы протекают в период развития и внедрения технологии безэкипажного судовождения, реализации концепции автономного судна. В декабре 2020 года вступило в действие постановление «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации» [4], определив официальный старт практической проверки концепции автономных судов и беспилотного судовождения, технологических разработок для современных судов, как отечественной, так и зарубежной постройки, на борту которых установлено энергетическое оборудование

и системы управления разных типов от ведущих изготовителей. К моменту завершения эксперимента актуальной видится задача обеспечения автоматического (unmanned) и удаленного управления безэкипажным судном с учетом выполнения требований законодательства в части безопасности и ограничения выбросов.

Тенденция к внедрению безэкипажного судоходства (БЭС) позволит обеспечить спрос на интегрированные системы управления с учетом мониторинга и диагностирования технического состояния судовых технических средств при переходе от модели к готовой продукции.

Литература

1. Епихин А.И. Обзор современных способов автоматического управления судовых энергетических установок. «Вестник Волжской государственной академии водного транспорта». Том 54, выпуск №54. Нижний Новгород, 2018.
2. Худяков С.А., Игнатенко А.В. Современные судовые малооборотные дизельные двигатели: состояние, перспективы и проблемы. Эксплуатация морского транспорта. 2020. №1 (94). СПб, 2020.
3. Maritime forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2020. [Электронный ресурс] <https://eto.dnv.com/2020>
4. Постановление Правительства Российской Федерации №2031 от 5 декабря 2020 года «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации». Москва, 2020. 8 с.
5. Горева Т.И., Порнягин Н.Н., Пюкке Г.А. Нейросетевые модели диагностики технических систем. Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. Петропавловск-Камчатский, №1/2012.
6. Епихин А.И. Диагностические модули системы поддержки принятия решений для танкеров-газовозов. «Вестник Астраханского государственного технического университета». Серия «Морская техника и технология». Выпуск №2. Астрахань, 2017.

7. Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Принципы нейро-управления и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к сложной динамической системе СЭУ-судно. «Морские интеллектуальные технологии» №4 (50) т.4. СПб, 2020.
8. Пат. РФ № RU 2737457 С1. Епихин А.И. Автоматическая система с нейро-нечеткой сетью для комплексной технической диагностики и управления судовой энергетической установкой; опубл. 30.11.2020, Бюл. № 4, «Изобретения. Полезные модели».
9. Игнатенко А.В., Мигель Д.В. Развитие судовых систем питания с берега. AMP. Cold Ironing. Научно-технические, экономические и правовые аспекты развития транспортного комплекса: материалы III национальной научно-практической конференции 14-15 ноября 2019 года в 2 ч. Ч1. Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2019. Новороссийск, 2019.

References

1. Epikhin A.I. Obzor sovremennykh sposobov avtomaticheskogo upravleniya sudovykh energeticheskikh ustanovok [Review of modern methods of automatic control of ship power plants]. «Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta». Tom 54, vypusk №54. Nizhniy Novgorod, 2018.
2. Khudyakov S.A., Ignatenko A.V. Sovremennye sudovye malooborotnye dizel'nye dvigateli: sostoyanie, perspektivy i problem [Modern marine low-speed diesel engines: state, prospects and problems]. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2020. №1 (94). SPb, 2020.
3. MARITIME FORECAST TO 2050. Energy Transition Outlook 2020. [Elektronnyy resurs] <https://eto.dnv.com/2020>
4. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii №2031 ot 5 dekabrya 2020 goda «O provedenii eksperimenta po opytной ekspluatatsii avtonomnykh sudov pod Gosudarstvennym flagom Rossiyskoy Federatsii» [On conducting an experiment on the pilot operation of autonomous vessels under the State Flag of the Russian Federation]. Moskva, 2020. 8s.
5. Goreva T.I., Pornyagin N.N., Pyukke G.A. Neyrosetevye modeli diagnostiki tekhnicheskikh system [Neural network models of diagnostics of technical systems.]. Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki. Petropavlovsk-Kamchatskiy, №1/2012.
6. Epikhin A.I. Diagnosticheskie moduli sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya tankerov-gazovozov [Diagnostic modules of the decision support system for gas tankers]. «Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta». Seriya «Morskaya tekhnika i tekhnologiya». Vypusk №2. Astrakhan', 2017.
7. Epikhin A.I., Khekert E.V., Modina M.A. Printsipy neyro-upravleniya i varianty arkhitektury neyronnykh setey, primenitel'no k slozhnoy dinamicheskoy sisteme SEU-sudno [Principles of neuro-control and variants of neural network architecture, applied to a complex dynamic system of SEU-ship]. «Morskie intellektual'nye tekhnologii» №4 (50) т.4. SPb, 2020.
8. Pat. RF № RU 2737457 С1. Epikhin A.I. Avtomaticheskaya sistema s neyro-nechetkoy set'yu dlya kompleksnoy tekhnicheskoy diagnostiki i upravleniya sudovoy energeticheskoy ustanovkoy [Automatic system with a neuro-fuzzy network for complex technical diagnostics and control of a ship's power plant]. opubl. 30.11.2020, Byul. № 4, «Izobreteniya. Poleznye modeli».
9. Ignatenko A.V., Migel' D.V. Razvitie sudovykh sistem pitaniya s berega. AMP [Development of ship power systems from the shore]. Cold Ironing. Nauchno-tekhnicheskie, ekonomicheskie i pravovye aspekty razvitiya transportnogo kompleksa: materialy III natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii 14-15 noyabrya 2019 goda v 2 ch. Ch1. Novorossiysk: RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. 2019. Novorossiysk, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Иванович Епихин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судовых механических установок», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Александр Владимирович Игнатенко, старший преподаватель, начальник кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств судовой автоматизации, начальник судомеханического факультета, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: iscander@hotmail.co.uk

Alexey I. Epikhin, Ph.D (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Operation of ship mechanical installations», Admiral Ushakov State Maritime University, Lenin Ave., 93, Novorossiysk, 353924, Russia, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Aleksandr V. Ignatenko, senior lecturer, head of the Department of Marine Electrical Equipment and Automation Equipment Operation, Head of the Faculty of Ship Mechanics, Admiral Ushakov State Maritime University, Lenin Ave., 93, Novorossiysk, 353924, Russia, e-mail: scander@hotmail.co.uk

Поступила в редакцию: 14.07.2021
Принята к публикации: 13.08.2021

УДК 621.12

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.038>

К вопросу о применении на линейных атомных ледоколах ГТЗА с прямой передачей

В.А. Гулый¹, e-mail: gbavladimir@yandex.ru, И.С. Сербин², e-mail: serbin_is@paoktz.ru
¹предприятие «Прогресс», ²«Калужский турбинный завод»

Аннотация. В статье проведено краткое сопоставление основных характеристик гребных электрических установок, традиционно применяемых на отечественных атомных ледоколах, и судовых реверсивных главных турбозубчатых агрегатов. В работе показано, что естественные механические характеристики турбозубчатых агрегатов позволяют удовлетворить основные требования к работе ледокольных двигатель-двигательных установок без построения сложных систем, которые имеют место в гребных электрических установках для получения искусственных механических характеристик электродвигателей с организацией диапазонов работы с постоянством мощности, диапазонов работы с ограничением крутящих моментов, а также – решения задачи утилизации рекуперированной энергии при реверсах гребных винтов. В аналитическом разделе статьи показано, что в предложенной установке с прямой передачей мощности на гребной винт задача поддержания постоянства мощности энергоустановки на номинальных эксплуатационных режимах, задача обеспечения работы установки при движении в ледовом поле, когда требуется обеспечить «фрезерование» льда, чтобы исключить заклинивание и поломку гребного винта с ограничением максимальных перегрузочных крутящих моментов на гребном валу, задача реверсирования гребного винта решаются за счет использования естественных механических характеристик реверсивного турбозубчатого агрегата. При создании перспективных тяжелых атомных ледоколов рекомендуется применение более простой, надежной и экономичной схемы построения ледокольных главных энергетических установок на основе современных конструкций турборедукторных тепловых двигателей для привода гребных винтов.

Ключевые слова: ледокол, главная энергетическая установка, гребная электрическая установка, турбогенератор, главный турбозубчатый агрегат, гребной винт, разгон, торможение, реверс, характеристика постоянства мощности, ограничение крутящего момента.

On the question of the use of GTZA with direct transmission on linear nuclear icebreakers

Vladimir A. Gulyy¹, e-mail: gbavladimir@yandex.ru, Ivan S. Serbin², e-mail: serbin_is@paoktz.ru

¹The company "Progress", St. Petersburg, Russian Federation, ²«Kaluga Turbine Plant», Kaluga, Russian Federation

Abstract. The article presents a brief comparison of the main characteristics of rowing electric installations, traditionally used on domestic nuclear icebreakers, and ship reversible main turbine with gearbox. The paper shows that the natural mechanical characteristics of turbine with gearbox allow us to meet the basic requirements for the operation of icebreaking propulsion systems without building complex systems that take place in rowing electric installations to obtain artificial mechanical characteristics of electric motors with the organization of ranges of operation with constant power, ranges of operation with limited torques, as well as solving the problem of utilization of recovered energy during propeller reversals. The analytical section of the article shows that in the proposed installation with direct power transmission to the propeller, the task of maintaining the constancy of the power plant's power at nominal operating conditions, the task of ensuring the operation of the installation when moving in an ice field, when it is necessary to ensure "ice milling" to eliminate jamming and breakage of the propeller with limiting the maximum overload torques on the propeller shaft, the task of reversing the propeller is solved by using the natural mechanical characteristics of a reversible turbine with gearbox. When creating promising heavy nuclear icebreakers, it is recommended to use a simpler, reliable and economical scheme for building icebreaking main power plants based on modern designs of turbine with gearbox as heat engines for driving propellers.

Key words: icebreaker, main power plant, propeller electric plant, turbine generator, main turbo-gear unit, propeller, acceleration, braking, reverse, power constancy characteristic, torque limitation.

Введение и актуальность проблемы

В мировом судостроении постоянно идет конкурентное соревнование между различными направлениями развития судового энергомашиностроения, в частности, в области создания главных двигатель-двигательных комплексов (ДДК).

Как известно, основными на сегодняшний день являются три основных вида главных двигателей:

- дизельные,
- паротурбинные,
- газотурбинные.

Каждый из перечисленных видов тепловых двигателей можно использовать как в установках с передачей энергии на судовые движители

механическим путем, так - и в гребных электрических установках с промежуточным преобразованием энергии в электрическую для питания гребных электродвигателей, приводящих во вращение гребные винты.

Сторонники применения на судах гребных электрических установок опираются на высокотехнологичные электрические составные части ДДК, которые активно и небезуспешно развиваются как в мировом судовом энергомашиностроении, так и в отечественных отраслях промышленности, где при тесном сотрудничестве научно-исследовательских коллективов и промышленных предприятий создаются новые образцы гребных электрических установок. Примером одного из последних

уникальных примеров главных энергетических установок, реализующих принцип электродвижения, может явиться гребная установка, созданная для строящейся в России серии универсальных атомных ледоколов проекта 22220.

Атомные ледоколы, о которых в первую очередь пойдет речь в статье, исходя из основного назначения – осуществлять проводку караванов судов в тяжелых ледовых условиях, должны иметь большое водоизмещение, что требует больших мощностей главных двигателей, в качестве которых сегодня применяются турбоэлектрические гребные установки с приводом генераторов от паровых турбин, получающих пар от атомных паропроизводящих установок.

Практика строительства атомного ледокольного флота в течение многих десятилетий, сначала в СССР, а теперь и в Российской Федерации, подтверждает необходимость использования атомной энергетики на тяжелых ледоколах.

В настоящей статье авторы не ставят задачей внести свое однозначное видение в позиционную борьбу сторонников применения тех или иных видов перечисленных выше главных судовых двигателей, но предлагают еще раз, применительно именно для использования в мощных современных атомных ледоколах, рассмотреть альтернативу применению гребных электрических установок, а именно – применение главных турбозубчатых агрегатов (ГТЗА).

Взгляд на историю развития ледокольной энергетики

Здесь стоит вспомнить, что в СССР был построен и эксплуатируется до настоящего времени атомный лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть», укомплектованный ГТЗА. В части применения основной турбозубчатой передачи в энергетической ледокольной установке можно также привести пример американского тяжелого ледокола "Polar Star".

Следует отметить, что для атомных ледоколов имеют место ряд специфических требований к механическим характеристикам [1] главных двигателей ледоколов, приводящих во вращение гребные винты, в частности - необходимость реализации в главной двигательной установке ледокола режимов постоянства мощности при движении во льдах и получение существенных, но допустимых и контролируемых перегрузок по крутящему моменту в режимах «фрезерования» льда, когда нельзя допустить остановки гребного винта при движении ледокола в ледовом массиве.

Можно предположить, что на стадии становления энергетики атомных ледоколов с учетом большого опыта, накопленного отечественной электротехнической промышленностью при создании мощных тяговых электроприводов для различных машин и механизмов, а также судов с дизель-электрическими гребными установками [2], в которых оценка значений мощностей и моментов на валах электрических машин осуществлялась путем измерения электрических параметров (тока, напряжения, частоты вращения) и пересчета электрических параметров в значения механических мощностей и моментов на валах гребных электродвигателей, в качестве единственно

возможного был принят вариант построения главной двигательной установки атомного ледокола на принципе электродвижения. Как справедливо отмечено в [3], широкое применение систем электродвижения на различных типах судов ограничено большой массой, габаритами, стоимостью, а также низкой надежностью и сложностью используемого электрооборудования. Еще одним фактором, указывающим на проблемность широкого применения систем электродвижения, является их сложность, требующая высокой квалификации обслуживающего персонала.

Тем не менее, исторически сложившаяся идеология использования систем электродвижения (СЭД) в главных энергетических установках (ГЭУ) ледоколов со временем стала, своего рода, традицией, которая ведет ко все большему усложнению и удорожанию ледокольных главных энергетических установок.

Данью упомянутой традиции явилась комплектация ледокола дополнительно к общесудовой электростанции электроэнергетической системой, которая до сегодняшнего дня еще более совершенствуется, а это значит – усложняется. В попытке минимизировать количество электрогенерирующего оборудования на ледоколах проекта 22220 построена единая электроэнергетическая система ледокола, предназначенная как для обеспечения электроэнергией общесудовые потребители, так и для питания главных электродвигателей ледокола.

Это решение привело к необходимости ужесточения требований к паротурбинному агрегату, (значит – к его усложнению и удорожанию), а именно – к системе регулирования, управления и защиты турбины, которая должна соответствовать требованиям, предъявляемым к подобным системам турбин электростанций. Подобная точность поддержания частоты вращения турбогенератора автономно работающей системы электродвижения ледокола излишня.

В мощных атомных ледоколах, гребные электрические установки, имеющие в своем составе первичные главные тепловые двигатели – паровые турбины с обязательным набором теплотехнического и механического оборудования, также включают сложнейшую электроэнергетическую систему, состоящую, из сочетания первичных двигателей, генераторов, преобразователей, гребных электродвигателей, аппаратуры управления, регулирования, защиты и блокировки [2], элементы которой, находясь во взаимодействии, обеспечивают генерирование, трансформацию, распределение и потребление электроэнергии. Промежуточное преобразование механической энергии в электрическую, а затем опять в механическую энергию вращения гребных винтов, потери энергии в токопроводящих коммуникациях неизбежно приводит к снижению к.п.д.

Имеет место еще одна особенность судовых систем электродвижения, которую можно отнести к отрицательным: при маневрировании, связанном с торможением ледокола, а также при изменении направления движения ледокола необходимо поглотить энергию инерции ледокола. В связи с этим в ледокольных системах электродвижения, не

имеющих возможности вернуть (рекуперировать) энергию торможения в турбогенератор, приходится существенно усложнять систему гашения энергии, используя перенаправление потоков рекуперированной энергии либо на тормозные резисторы через звено постоянного тока, либо на соседние электродвигатели в многодвигательных гребных электрических установках существующих ледоколов [4].

Теперь давайте попытаемся в качестве альтернативы традиционному принципу электродвижения, который использовался на всех созданных ранее и используется на строящейся в настоящее время серии атомных ледоколов проекта 22220, рассмотреть применение в качестве главной двигательной установки турбозубчатый агрегат – условный вид на рис.1.

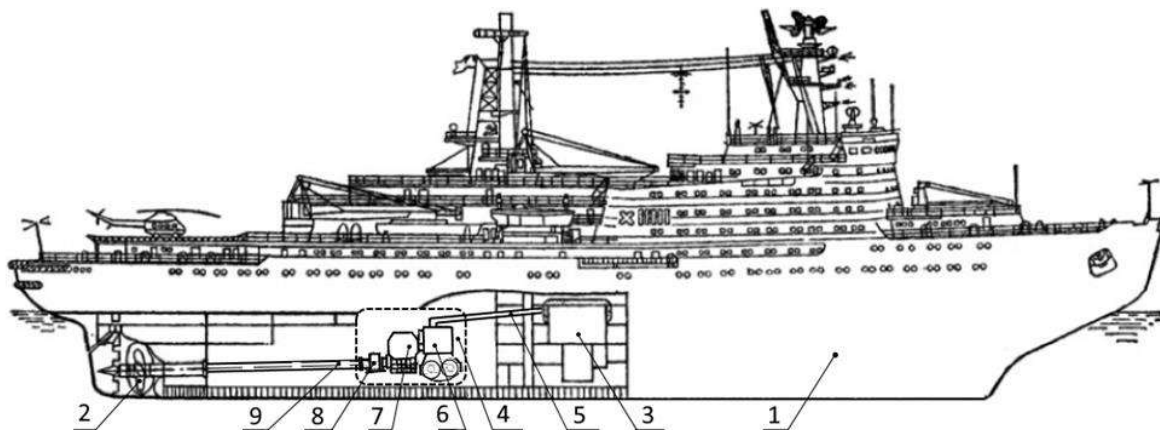


Рис. 1. Атомный турборедукторный ледокол

1 – атомный ледокол; 2 – гребной винт; 3 - атомная паропроизводящая установка; 4 - главный паротурбинный агрегат; 5 – паропровод; 6 – реверсивная турбина; 7 – редуктор; 8 – главный упорный подшипник; 9 – выходной вал главного паротурбинного агрегата

Функционирование ледокола должно осуществляться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к судам данного класса, а именно – обеспечение проводки караванов судов в ледовых условиях. При этом в рассматриваемой, в общем случае – типовой, главной турборедукторной энергоустановке, согласно установившейся терминологии – главном турбозубчатом агрегате (ГТЗА), энергия пара, подаваемого по паропроводу в главный паротурбинный агрегат, преобразуется реверсивной паровой турбиной в механическую энергию, которая через редуктор и главный упорный подшипник, воспринимающий упор гребного винта, приводит во вращение гребной винт, обеспечивающий движение ледокола. Для упрощения дальнейшего изложения статьи для отличия ледокола с ГТЗА от ледокола с СЭД (система электродвижения) будем использовать условный термин «турборедукторный ледокол».

Как известно, на современных судах с атомными энергоустановками, а также, в частности - на атомном лихтеровозе-контейнеровозе «Севморпуть» в качестве главных двигательных установок применяются ГТЗА, которые преобразуют энергию пара, генерируемого в атомной паропроизводящей установке, в механическую энергию вращения гребных винтов. В ГТЗА отсутствует промежуточное преобразование энергии из механической в электрическую и обратно, как это происходит в гребных электрических установках.

Надо иметь в виду, что технический уровень созданных главных судовых турбозубчатых агрегатов чрезвычайно высок, состав основного и вспомогательного энергетического оборудования и систем управления лаконичен, отработан, его

качество подтверждено эксплуатацией в течение многих десятилетий паротурбинных судов с атомными энергоустановками, соизмеримыми по мощности с установками атомных ледоколов.

Перейдем от рассмотренных очевидных преимуществ ГТЗА, в части их простоты по сравнению с СЭД, к рассмотрению механических характеристик ГТЗА как главного двигателя ледокола с атомной паропроизводящей установкой в их сопоставлении с механическими характеристиками, требующимися применительно к условиям эксплуатации ледоколов в условиях ледового плавания, и реализуемыми сегодня в гребных электрических установках.

1. Механические характеристики двигательного комплекса турборедукторного ледокола

1.1 Движение ледокола при неизменном направлении вращения гребного винта

На качество управления движением судна непосредственно влияют характеристики главного двигателя, гребного винта и корпуса судна, а косвенно – характеристики источника энергии – в рассматриваемом случае – теплогенерирующей и парогенерирующей частей ГЭУ (главная энергетическая установка).

Исходя из функционального назначения ГЭУ ледокола – обеспечения требуемой его скорости хода и маневренности, система управления ГЭУ должна обладать определенными показателями качества управления и регулирования частоты вращения гребного винта как физической величины,

которой в первом приближении пропорциональна скорость ледокола.

В общем случае ДДК судна принято считать единым объектом управления, состоящим из двух аккумуляторов энергии – вращающейся системы «ГТЗА-валопровод-гребной винт» и корпуса судна, связанного с ней гидродинамическими характеристиками гребного винта.

В конечном итоге, мощность главного двигателя – ГТЗА, передаваемая на гребной винт, определяет состояние ДДК, а алгоритмы управления ГТЗА при маневрировании ледокола, которые реализуются системой управления ГТЗА, при заданных водоизмещении ледокола и мощности ГЭУ оказывает решающее влияние на маневренные характеристики судна.

Известно [5], уравнение динамики ротора турбины вместе с присоединенными к нему массами:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_{Tc}; \quad (1)$$

В этом уравнении: J – момент инерции масс ротора турбины и присоединенных масс, приведенный к оси ротора;

M_t – вращающий момент, развиваемый турбиной при расширении пара в ее проточной части и приведенный к оси ротора турбины;

M_{Tc} – момент сопротивления вращению ротора турбины;

ω – угловая частота вращения ротора турбины;

t – текущее время.

Каждое слагаемое в правой части формулы (1) является функцией (в общем случае – нелинейной) нескольких переменных величин ДДК.

Так вращающий момент, развиваемый турбиной, является функцией угловой частоты вращения ротора ω и расхода пара через паровой клапан и турбину G , т.е. $M_t = M_t(\omega, G)$.

Воспользуемся формулой (II.3) из [5] для выражения статической характеристики турбины:

$$M_t = M_{Tном} \frac{G}{G_{ном}} \left[\mu - (\mu - 1) \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right], \quad (2)$$

или в относительных единицах

$$\bar{M}_t = \bar{G} [\mu - (\mu - 1) \bar{\omega}], \quad (3)$$

где, $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{ном}}$ – угловая частота вращения вальной системы ГТЗА в относительных единицах,

M_{tmax} – максимальный момент, развиваемый заторможенной турбиной,

$M_{tном}$ – вращающий момент на валу турбины на номинальном режиме,

$\mu = \frac{M_{tmax}}{M_{tном}}$ – кратность пускового момента турбины.

Для паровых турбин [5] с достаточной для нас степенью приближения можно считать $\mu = 2$.

Тогда выражение (3) примет вид:

$$\bar{M}_t = \bar{G}(2 - \bar{\omega}). \quad (4)$$

Статическую характеристику гребного винта для крупнотоннажных судов, на которых, в первую очередь, устанавливаются паротурбинные

установки, для прямолинейного установившегося движения судна можно представить в общепринятой форме уравнения квадратичной параболы:

$$\bar{M}_v = k\bar{\omega}^2, \quad (5)$$

где k – коэффициент гребного винта, зависящий в общем случае от плотности воды, геометрических размеров винта, поступи винта.

На рис. 2 представлены механические характеристики ГТЗА \bar{M}_t (4) и гребного винта \bar{M}_v (5). В диапазоне режимов, близких к номинальному \bar{M}_t тном, характеристика ГТЗА, практически, совпадает с характеристикой постоянства мощности « \bar{M} при $\bar{N} = \bar{N}_{ном} = const$ » и имеет вид, аналогичный характеристике, искусственно получаемой в системах электродвижения [1]. В режимах с малой частотой вращения, но с максимальными крутящими моментами, их значения лежат в пределах до двойного номинального. При работе на номинальной частоте вращения и снижении нагрузки на винте ГТЗА переходит на регуляторную характеристику $\bar{M}_{Tрчв}$, когда вступает в работу регулятор частоты вращения ротора турбины.

Таким образом, в атомном турборедукторном ледоколе, благодаря естественным моментным характеристикам ГТЗА, без дополнительных мероприятий выполняется требование реализации в главной двигательной установке ледокола режимов, близких к режимам постоянства мощности при движении во льдах, и получение существенных, но допустимых перегрузок ГТЗА по крутящему моменту (режимы «фрезерования» льда).

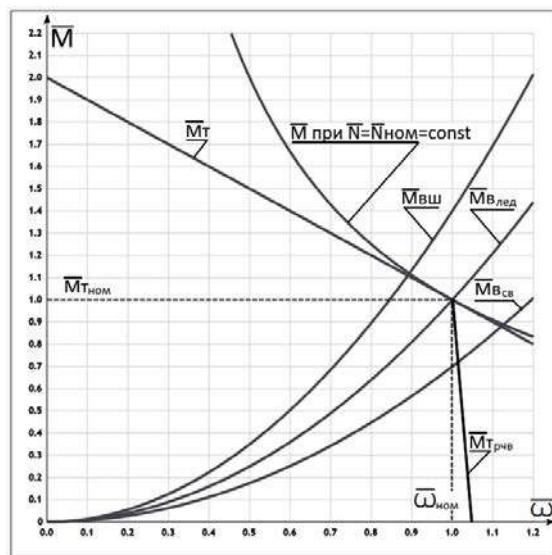


Рис. 2. Механические характеристики двигательного комплекса с ГТЗА

\bar{M}_t – естественная механическая характеристика ГТЗА;

$\bar{M}_{tном}$, $\bar{\omega}_{ном}$ – номинальные значения момента и частоты вращения ГТЗА;

$\bar{M}_{Tрчв}$ – регуляторная механическая характеристика ГТЗА;

$\bar{M}_{ВШ}$ - швартовная характеристика гребного винта;
 $\bar{M}_{Влед}$ - характеристика гребного винта при движении в ледовых условиях;
 $\bar{M}_{Всв}$ - характеристика гребного винта при движении в свободной воде;
 \bar{M} при $\bar{N} = \bar{N}_{НОМ} = const$ - характеристика постоянства мощности.

1.2 Реверс гребного винта турборедукторного ледокола

Следующий момент, на котором необходимо заострить внимание – режимы торможения и реверсирования гребного винта ледокола в процессе маневрирования.

Достаточно подробно процессы изменения энергопотоков при реверсировании ГЭД в системах электродвижения ледоколов рассмотрены в [9], где названы проблемы, возникающие при реверсировании гребных винтов и ограниченных возможностях гашения рекуперированной энергии в цепях главного тока и предусматриваемых в СЭД активных электрических тормозных сопротивлениях.

Здесь стоит вспомнить далекий 1985 год, в котором коллективом авторов, представлявшим Ленинградский Кировский завод и ЦКБ «Айсберг», было получено авторское свидетельство на изобретение [6] судовой турбоэлектрической гребной установки, в которой для компенсации рекуперированной энергии торможения судна было предложено ввести в приводную турбину электрогенератора тормозную ступень с лопатками, противоположно направленными по отношению к лопаткам основных турбинных ступеней. Это еще раз подтверждает актуальность решения задачи утилизации рекуперированной энергии при реверсах в СЭД.

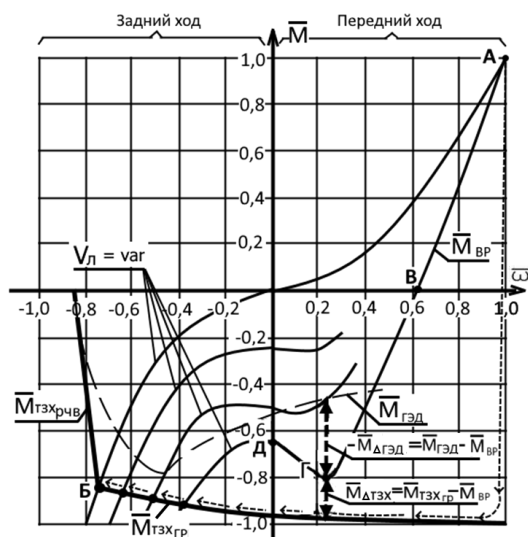


Рис. 3. Механические реверсивные характеристики двигатель-движительного комплекса

$\bar{M}_{ТЗХгр}$ - граничная механическая характеристика ТЗХ;
 $\bar{M}_{ГЭД}$ - механическая характеристика ГЭД;

$\bar{M}_{ТЗХрчв}$ - регуляторная механическая характеристика ТЗХ;
 $\bar{M}_{\Delta ТЗХ}, \bar{M}_{\Delta ГЭД}$ - динамические моменты на переходных режимах при реверсах;
 $Vл = var$ - изменение реверсивной характеристики гребного винта $\bar{M}_{Вр}$ при различных скоростях движения реверсируемого ледокола

В предлагаемом турборедукторном ледоколе процесс поглощения рекуперированной энергии при торможениях и изменениях направления движения ледокола происходит за счет подачи пара на турбину противоположного направления вращения реверсивной паровой турбины ГТЗА.

Рассмотрим семейство реверсивных характеристик $\bar{M}_{Вр}$ гребного винта, представленное на рис. 3, где также изображены моментные характеристики, обозначения и расшифровки которых представлены в подрисуночном тексте.

Обратимся к [9], где подробно рассмотрен процесс реверса гребного винта в СЭД. Режимная точка реверсируемого ДДК при реверсе гребного винта перемещается по характеристике $\bar{M}_{Вр}$, причем

- на участке АВ происходит торможение вращающихся масс гребной вальной системы за счет гидродинамических сил набегающего потока воды,
- на участке ВГД гребной винт переходит в режим гидротурбины, и для его торможения, остановки и изменения направления вращения необходимо обеспечить поглощение энергии от винта и приложить к гребному валу крутящий момент противоположного направления,

- далее происходит разгон гребного винта и ледокола в направлении заднего хода с одновременным изменением реверсивной характеристики для различных скоростей ледокола, на рис. 3 - "Vл = var".

Критическим периодом при реверсировании гребного винта в гребной электрической установке является отрезок торможения ВГД, что объясняется весьма ограниченными возможностями системы электродвижения поглощать энергию рекуперации, что организуется путем включения в цепь главного тока активных сопротивлений, на которых должна гаситься энергия от гребных электродвигателей, переводимых при реверсе в генераторный режим.

Теперь проанализируем протекание реверса в ГТЗА, имеющем в своем составе ТЗХ.

Принимая во внимание, что времена перемещения регулирующих клапанов в ГТЗА составляют порядка (0,5...0,8) с, а практические времена разгона $Ta = J \frac{\omega_{НОМ}}{M_{ГНОМ}}$, характеризующие

инерционность вращающихся масс ротора турбины и присоединенных масс, приведенный к оси ротора – (8...12)с, можно считать, что закрытие регулирующего клапана турбины переднего хода (ТПХ) и одновременное открытие клапана турбины заднего хода (ТЗХ) происходит за пренебрежимо малый отрезок времени. Соответственно, ГТЗА за

этот же малый отрезок времени изменяет направление вращающего момента вальной системы ГТЗА с переднего хода на задний ход.

Вращающий момент ТЗХ при реверсе может достигать значений, превышающих номинальное значение. Скорее всего, при реверсах гребного винта использовать полностью форсировочные возможности реверсивной турбины из прочностных соображений не следует. Примем $\bar{M}_{ТЗХгр} \approx 1$ из рис. 3 (ограничение можно реализовать, как это изложено ниже, в п.2).

На рис. 3 показано пунктиром движение режимной точки состояния ДДК при реверсе гребного винта от номинального значения $\bar{M}_{вр, ном} = 1 = \bar{M}_A$ (точка А) до режима $\bar{M}_{вр} = \bar{M}_B$ (точка Б).

Здесь представлены для качественного сопоставления динамические вращающие моменты ГЭД и ТЗХ ГТЗА в рассматриваемом режиме реверсирования гребного винта.

Как известно, динамическим моментом M_Δ

принято называть разность вращающего момента и момента статических сопротивлений в динамической системе.

Уравнение динамики системы «главный судовой двигатель – гребной винт» в обобщенном виде, как упоминалось ранее (1), в относительных единицах записывается:

$$J \frac{\omega_{ном} d\bar{\omega}}{M_{Т, ном} dt} = \bar{M}_T - \bar{M}_{Tc} = \bar{M}_{ТЗХ} - \bar{M}_{вр} = \bar{M}_\Delta \quad (1)$$

В точке Г, когда реверсивная характеристика гребного винта имеет экстремум, на рис. 3 показаны динамические моменты ТЗХ $\bar{M}_\Delta \text{ ТЗХ}$ и, по аналогии для ГЭД - $\bar{M}_\Delta \text{ ГЭД}$.

Первый из указанных динамических моментов имеет положительное значение, что указывает на существование разгона гребной вальной системы.

Второй из указанных динамических моментов имеет знак « - », что говорит о «зависании» режима реверса до момента когда реверсивная характеристика гребного винта из семейства $V_L = var$ достигнет положения, при котором динамический момент ГЭД не приобретет положительное значение, и процесс реверса гребного винта продолжится.

Таким образом, реверс гребного винта в турборедукторном ледоколе, вследствие наличия в составе ГТЗА мощной ТЗХ, соизмеримой по мощности с ТПХ, происходит без ограничений, имеющих место в системах электродвижения, связанных с приемом в систему энергии, рекуперированной со стороны гребного винта.

2. Алгоритм управления ГТЗА при необходимости управления ограничением максимального крутящего момента

При эксплуатации ледокола могут возникать задачи, связанные с необходимостью ограничений:

- либо ограничения крутящего момента вальной системы ДДК при достаточной паропроизводительности ГЭУ, когда клапан регулирования давления перед ходовыми регулирующими клапанами ГТЗА открыт и имеется

запас пара, стравливаемый в дроссельно-увлажнительную установку ГЭУ,

- либо ограничения мощности, потребляемой ГТЗА и передаваемой на гребной винт при недостаточной паропроизводительности ГЭУ, когда клапан регулирования давления перед ходовыми регулирующими клапанами ГТЗА закрыт.

Алгоритм ограничения крутящего момента вальной системы ДДК при достаточной паропроизводительности ГЭУ достаточно хорошо описан в [7].

В основу алгоритма управления ГТЗА для этого случая заложены следующие предпосылки.

Обратимся к механической характеристике турбоагрегата, которая, как было сказано выше, весьма достоверно может быть описана известной зависимостью (3) в относительных единицах.

Расход пара в турбину \bar{G} в зависимости от величины открытия \bar{m} регулирующего клапана может быть приближенно представлен [8] линейной зависимостью:

$$\bar{G} = \bar{m}. \quad (6)$$

Переходя к относительным единицам и подставляя выражение (6) в (4), получим:

$$\bar{m} = \frac{\bar{M}_T}{(2-\bar{\omega})}. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой алгоритм, по которому система автоматического управления ГТЗА может обеспечить ограничение заданного значения вращающего момента гребного винта, используя сигнал фактической частоты вращения ротора турбины и ограничивая возможность открытия регулирующего клапана. Этот алгоритм можно использовать при динамических процессах маневрирования ледокола: движение на циркуляциях и в условиях качки при волнении поверхности моря, когда возмущения со стороны гребного винта на паропроизводящую установку можно и нужно ограничивать.

Задаваясь граничным значением момента $\bar{M}_{гр}$ и измеряя фактическую частоту вращения ротора турбины, из (7) получаем требуемую зависимость уровня граничного перемещения регулирующего

органа $\bar{m}_{гр}$ от частоты вращения $\bar{\omega}$ для заданного граничного момента:

$$\bar{m}_{гр} = \frac{\bar{M}_{гр}}{(2-\bar{\omega})}.$$

Полученную гиперболическую зависимость можно в диапазоне рабочих частот вращения ГТЗА $0 \leq \bar{\omega} \leq 1$ аппроксимировать линейной зависимостью

$$\bar{m}_{гр} = \frac{\bar{M}_{гр}}{2} (\bar{\omega} + 1),$$

которая имеет погрешность аппроксимации, не превышающую 10%.

Блок схема системы ограничения вращающего момента ГТЗА, представлена на рис.4.

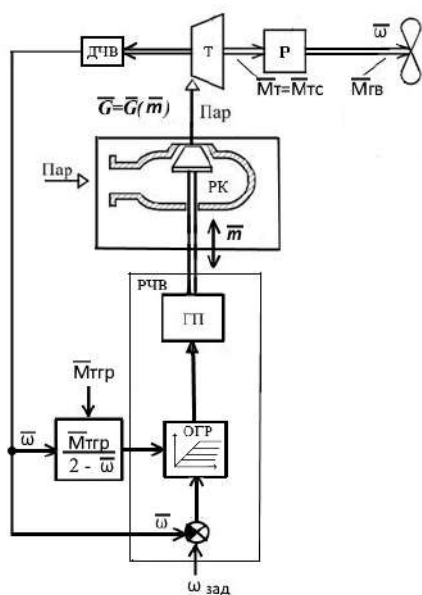


Рис. 4. Блок схема системы ограничения вращающего момента ГТЗА

ДЧВ, РЧВ – датчик частоты вращения, регулятор частоты вращения;

ОГР – ограничитель открытия РК;

Т, Р, РК, ГП – турбина, редуктор, регулирующий клапан, гидропривод

Алгоритм ограничения мощности, потребляемой ГТЗА и передаваемой на гребной винт при недостаточной паропроизводительности ГЭУ, когда клапан регулирования давления перед ходовыми

регулирующими клапанами ГТЗА закрыт, обеспечивается хорошо известными в ГТЗА, так называемыми, регуляторами минимального давления – РМД, действие которых при недостаточности производительности паропроизводящей установки направлено на ограничение открытия регулирующего ходового клапана турбины. Достаточно подробно изложены вопросы совместного регулирования паропроизводящей установки и ГТЗА, например, в [10]. В границах предлагаемой к рассмотрению статьи более детально остановиться на алгоритмах управления, хорошо изученных и реализованных в судовых турборедукторных установках, представляется излишним.

Заключение

Представленные в статье результаты сопоставления систем электродвижения, традиционно применяемых в мощных атомных ледоколах, с судовыми главными турбозубчатыми агрегатами, указывают на ряд очевидных и существенных преимуществ турбозубчатых агрегатов.

При создании перспективных тяжелых атомных ледоколов целесообразно провести технико-экономическую оценку применения на ледоколах более простой, надежной и экономичной схемы построения ледокольных главных энергетических установок на основе современных конструкций турборедукторных тепловых двигателей для привода гребных винтов.

Литература

1. Рукавишников, С.Б. Автоматизированные гребные электрические установки / С.Б. Рукавишников. - Ленинград, «Судостроение», 1983 г., с. 87, рис. 3.2, §3.1.
2. А.Б.Дарьенков, Г.М.Мирясов, В.Г.Титов, М.Н.Охотников, Д.В.Умяров «Гребные электрические установки». ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», учебное пособие, Нижний Новгород, 2014.
3. Ф.А.Гельвер, И.В.Белоусов, В.Ф.Самосейко «Гребные электрические установки судов большой мощности». ВЕСТНИК ПНИПУ «Электротехника, информационные технологии, системы управления» 2019г. №30, УДК 629.5.07.
4. Патент РФ 2630024, МПК В63Н 21/21 (2006.01), В63Н 21/17 (2006.01), В63Н 23/24 (2006.01), В60L 11/00 (2006.01), В60L 7/16 (2006.01), В60L 7/18 (2006.01) на изобретение «Способ управления торможением и реверсом гребных электродвигателей судна». Публикация патента: 05.09.17. Авторы: Калинин Игорь Михайлович (RU), Иванова Мария Константиновна (RU), Екушов Алексей Александрович (RU), Соловей Валерий Сергеевич (RU), Балабанов Борис Андреевич (RU), Нечаев Юрий Игоревич (RU), Улитовский Дмитрий Иванович (RU).
5. Шифрин, М.Ш. Проектирование автоматических систем управления судовыми паротурбинными установками / М.Ш.Шифрин, В.Н.Новопашенный, Ю.М.Кадыров.– Л.: Судостроение, 1974, С. 33, § II-2.
6. Авторское свидетельство SU № 1134478 А, МПК В63Н 23/00 на изобретение «Судовая турбоэлектрическая гребная установка». Публикация авторского свидетельства: 15.01.85. Авторы: В.А. Гулый, М.Я. Леках, В.В. Сержантов, М.П. Алексеев, А.С. Козлов, Н.С.Рыжков.
7. Патент РФ 2024771, МПК F01D 21/02 (1990.01) на изобретение «Способ управления судовым главным турбозубчатым агрегатом и устройство для его осуществления». Публикация патента: 15.12.1994 г. Автор: Гулый Владимир Александрович (RU).
8. Гулый, В.А. Расходные характеристики регулирующих клапанов судовых паровых турбин / В.А.Гулый. – СПб.: Реноме, 2019 г. УДК 621.12, ISBN 978-5-00125-130-9.
9. Горбунов, Б.А. Современные и перспективные гребные электрические установки судов / Б.А.Горбунов, А.С.Савин, В.В.Сержантов – Л.: Судостроение, 1979.
10. В.А.Гулый, Д.Р.Ионин «Единый алгоритм управления мощностью корабельных главных парозенергетических установок на ядерном и органическом топливе». Системы управления и обработки информации. Научно-технический сборник «АВРОРА», выпуск 2 (49) июнь 2020г. Акционерное общество «Концерн «Научно-производственное объединение «Аврора».

References

1. Rukavishnikov S.B. Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki [Automated rowing electric power installations] / S.B. Rukavishnikov - Leningrad, «Sudostroenie», 1983, s. 87, ris. 3.2, §3.1.
2. A.B.Dar'enkov, G.M.Miryasov, V.G.Titov, M.N.Ohotnikov, D.V.Umyarov «Grebnye elektricheskie ustanovki» [Rowing electric power installations]. FGBOU VPO «Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E.Alekseeva», uchebnoe posobie, Nizhnij Novgorod, 2014.
3. F.A.Gel'ver, I.V.Belousov, V.F.Samosejko «Grebnye elektricheskie ustanovki sudov bol'shoj moshchnosti» [Rowing electric installations of high-power vessels]. VESTNIK PNIPU «Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya» 2019. №30, UDK 629.5.07.
4. Patent RF 2630024, MPK V63N 21/21 (2006.01), V63N 21/17 (2006.01), V63N 23/24 (2006.01), V60L 11/00 (2006.01), V60L 7/16 (2006.01), V60L 7/18 (2006.01) na izobretenie «Sposob upravleniya tormozheniem i reversom grebnyh elektrodvigatelej sudna» [Patent for the invention "Method for controlling the braking and reverse of the ship's rowing electric motors"]. Publikaciya patenta: 05.09.17. Avtory: Kalinin Igor' Mihajlovich (RU), Ivanova Mariya Konstantinovna (RU), Ekushov Aleksej Aleksandrovich (RU), Solovej Valerij Sergeevich (RU), Balabanov Boris Andreevich (RU), Nechaev YUrij Igorevich (RU), Ulitovskij Dmitrij Ivanovich (RU).
5. Shifrin, M.Sh. Proektirovanie avtomaticheskikh sistem upravleniya sudovymi paroturbinnymi ustanovkami [Design of automatic control systems for marine steam turbine installations] / M. Sh.Shifrin, V.N.Novopashennyj, Yu.M.Kadyrov.– L.: Sudostroenie, 1974, S. 33, § II-2.
6. Avtorskoe svidetel'stvo SU № 1134478 A, MPK V63N 23/00 na izobretenie «Sudovaya turboelektricheskaya grebnaya ustanovka» [Copyright certificate for the invention "Marine turboelectric propulsion system"]. Publikaciya avtorskogo svidetel'stva: 15.01.85. Avtory: V.A. Gulyy, M.YA. Lekah, V.V. Serzhantov, M.P. Alekseev, A.S. Kozlov, N.S. Ryzhkov.
7. Patent RF 2024771, MPK F01D 21/02 (1990.01) na izobretenie «Sposob upravleniya sudovym glavnym turbozubchatym agregatom i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya» [Patent for the invention "Method of controlling the ship's main turbo-toothed unit and a device for its implementation"]. Publikaciya patenta: 15.12.1994 g. Avtor: Gulyy Vladimir Aleksandrovich (RU).
8. Gulyy, V.A. Raskhodnye harakteristiki reguliruyushchih klapanov sudovyh parovyh turbin [Flow characteristics of control valves of marine steam turbines] / V.A.Gulyy. – SPb.: Renome, 2019 g. UDK 621.12, ISBN 978-5-00125-130-9.
9. Gorbunov, B.A. Sovremennye i perspektivnye grebnye elektricheskie ustanovki sudov [Modern and promising rowing electric installations of ships] / B.A. Gorbunov, A.S. Savin, V.V.Serzhantov – L.: Sudostroenie, 1979.
10. V.A. Gulyy, D.R. Ionin «Edinyj algoritm upravleniya moshchnost'yu korabel'nyh glavnym paroenergeticheskikh ustanovok na yadernom i organicheskom toplive» [Unified algorithm for controlling the power of shipboard main steam power plants on nuclear and organic fuel]. Sistemy upravleniya i obrabotki informacii. Nauchno-tekhnicheskij sbornik «AVRORA», vypusk 2 (49) iyun' 2020g. Akcionernoe obshchestvo «Koncern «Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie «Avrora».

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Александрович Гулый, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Прогресс», 191123, г. Санкт-Петербург, Гродненский пер., д. 16, литер А, офис 2Н, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

Vladimir A. Gulyy, Ph. D. (Eng), General Director of company "Progress", Grodnensky pereulok, 16, liter A, office 2H, Saint-Petersburg, 191123, Russian Federation, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

Иван Сергеевич Сербин, технический директор ПАО «Калужский турбинный завод», 248010, г. Калуга, ул. Московская, 241, e-mail: serbin_is@paoktz.ru

Ivan S. Serbin, Technical Director of Kaluga Turbine Plant, Moskovskaya, 241, Kaluga, 248010, Russian Federation, e-mail: serbin_is@paoktz.ru

Поступила в редакцию: 16.04.2021

Принята к публикации: 15.08.2021

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 629.12.001.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.013>

Колебания упругой пластины, расположенной в торце полубесконечного цилиндрического акустического волновода

В.Д. Лукьянов¹, e-mail: lukyanovvd@rambler.ru, Л.В. Носова², lvn1201@gmail.com,

Г.А. Лебедев³, e-mail: office@smtu.ru, С.В. Попков⁴, e-mail: krylov@ksrc.ru

¹ОАО «Авангард», ²ВКА им. А.Ф. Можайского, ³Санкт-Петербургский морской технический университет, ⁴ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Аннотация. Получено точное аналитическое решение задачи о гармонических изгибных колебаниях тонкой круглой упругой пластины, расположенной в торце полубесконечного цилиндрического акустического волновода. Кромка пластины жестко заделана в стенку волновода. Волновод с жестким корпусом заполнен идеальной сжимаемой акустической средой. Колебания пластины возбуждаются набегающими на неё нормальными волнами волновода, распределение акустического давления для которых имеет цилиндрическую симметрию. Проведено численное исследование смещения пластины на разных частотах возбуждения. Показано, что наличие сжимаемой среды существенно влияет на форму колебаний пластины. Совместные колебания акустической среды и упругой пластины носят резонансный характер. На резонансных частотах имеет место значительное увеличение амплитуды колебаний пластины. На форму колебания пластины влияют как распространяющиеся, так и неоднородные нормальные волны в волноводе, что приводит к увеличению узловых линий в распределении смещения пластины.

Ключевые слова: акустическая волна, волновод, нормальные волны, упругая пластина, изгибные колебания.

Oscillations of elastic plate, located at the end of semi-infinite cylindrical acoustic waveguide

Valeriy D. Lukyanov¹, e-mail: lukyanovvd@rambler.ru, Lyudmila V. Nosova², e-mail: lvn1201@gmail.com,

German A. Lebedev³, e-mail: office@smtu.ru, Sergey V. Popkov⁴, e-mail: krylov@ksrc.ru

¹Joint-stock company «Avangard», St. Petersburg, Russian Federation, ²Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation, ³St. Petersburg state marine technical university, Russian Federation, ⁴Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. An exact analytical solution to the problem of harmonic bending oscillations of a thin round elastic plate located at the end of a semi-infinite cylindrical acoustic waveguide has been obtained. Plate edge is rigidly embedded in waveguide wall. The waveguide with rigid housing is filled with an ideal compressible acoustic medium. The plate oscillations are excited by the normal waveguide waves running to the plate. The distribution of acoustic pressure for waves has cylindrical symmetry. Numerical study of plate displacement at different excitation frequencies was carried out. It has been shown that the presence of a compressible medium significantly affects the waveform of the plate oscillation. Joint oscillations of acoustic medium and elastic plate are resonant. There is a significant increase in amplitude of plate oscillations at resonant frequencies. The waveform of the plate oscillation is influenced by both propagating and inhomogeneous normal waves in the waveguide, which leads to an increase in the nodal lines in the displacement distribution of the plate.

Key words: acoustic wave, waveguide, normal waves, elastic plate, bending oscillations.

Введение

Решение задачи о прохождении акустических волн через упругую мембрану, перегородившую жесткую круглую трубу, впервые получено в работе [1] сведением задачи к интегральному уравнению, решение которого получено в виде ряда Неймана. Физическое исследование решения проводилось с использованием одного члена этого ряда.

Задача о рассеянии акустического поля на мембране, перекрывающей канал волновода, рассмотрена в монографии [2]. При аналитическом решении задачи методом разделения переменных (методом Фурье) акустическое давление ищется в виде разложения по нормальным волнам в волноводе, а смещение мембраны – в виде разложения по собственным формам колебания в вакууме. Задача сведена к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений. В задачах, решаемых методом Фурье, в общем случае получается бесконечная система уравнений, но с

диагональной матрицей, которая допускает аналитическое решение. Полученная в задаче о мембране бесконечная система имеет не диагональный вид и решалась методом последовательных приближений в предположении малости отношения плотности среды к плотности материала мембраны.

Идея точного решения задачи о колебании упругой пластины в плоском канале волновода, заполненном несжимаемой жидкостью, была высказана в работе [3]. Однако эта идея нигде, включая работу [3], не реализована при решении конкретной прикладной задачи.

Точные решения задач о прохождении нормальных волн через одну и две упругие перегородки в плоском и цилиндрическом волноводе получены сведением задачи к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, которую удалось решить обращением бесконечной матрицы [4-8].

Точное аналитическое решение задачи о прохождении нормальных волн через упругую пластину, перегородившую канал плоского волновода, получено методом Винера-Хопфа, причем стенки волновода были также упругими [9]. Общие вопросы применения метода Винера-Хопфа к подобным задачам рассмотрены в [10]. В работе [11] этим же методом решена задача для пластины в цилиндрическом волноводе с жестким корпусом. Здесь проведено исследование резонансного рассеяния нормальных волн на упругой пластине в волноводе.

Исследование резонансного рассеяния упругой мембраной нормальных волн в плоском акустическом волноводе проведено на основании точного решения задачи обращением бесконечных матриц [12].

Задача о прохождении нормальных волн через упругую круглую пластину в жестком кольце в цилиндрическом волноводе численно решалась в работе [13].

Вопросы приложения задач о прохождении нормальных волн через упругую перегородку в волноводе рассмотрены в [14].

В [15] получено точное решение задачи для случая, когда упругая пластина разделяет в плоском волноводе разные акустические среды. Проведено исследование влияния различия акустических сред на резонансное рассеяние волн.

В работах [4-15] полученные точные аналитические решения использовались для исследования акустического поля давления в волноводе. Представляет интерес исследовать вопрос о формах колебания пластины под действием акустического поля волновода.

1. Постановка задачи о колебании упругой пластины

Пусть круглая тонкая упругая пластина расположена на торце полубесконечного акустического волновода цилиндрической формы. Выбор цилиндрической системы координат (x, r) показан на рис. 1. Волновод с жестким корпусом заполнен сжимаемой акустической средой (жидкостью или газом). Пластина совершает изгибные колебания под воздействием акустических колебаний в волноводе. Рассматриваем волновые процессы в волноводе и колебания пластины, имеющие цилиндрическую симметрию.

Все колебательные процессы гармонически зависят от времени t , множитель $\exp(-i\omega t)$, задающий зависимость от времени, везде опускаем. В волноводе при $x > 0$ находится идеальная сжимаемая акустическая среда с плотностью ρ и скоростью распространения звука в этой среде c .

Акустическое давление $P(x, r)$ в среде, заполняющей волновод при $x > 0$ и $0 \leq r < R$, удовлетворяет однородному уравнению Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 P(x, r)}{\partial x^2} + D_r P(x, r) + k^2 P(x, r) = 0, \quad (1)$$

где D_r – дифференциальный оператор второго порядка по переменной r , $D_r = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \right)$, k – волновое число в среде, $k = \omega/c$, ω – круговая частота.

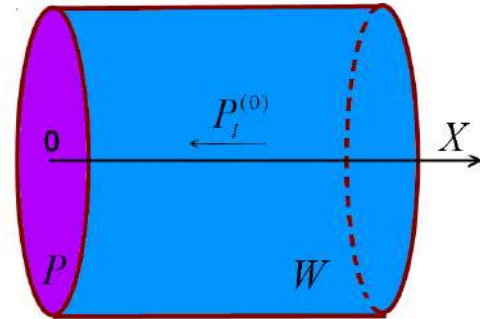


Рис. 1. Выбор цилиндрической системы координат для волновода (W) с упругой пластиной (P), расположенной в торце волновода $x = 0$, $0 \leq r \leq R$. Показана набегающая на пластину волна $P^{(0)}(x, r)$

Жесткий корпус волновода – цилиндрическая поверхность радиуса R : $0 < x < +\infty$, $r = R$. Условие отсутствия смещения корпуса волновода приводит к граничному условию

$$\frac{\partial P(x, R)}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

Пластина расположена в торце волновода: $x = 0$, $0 < r < R$. Изгибное смещение пластины $u = u(r)$ удовлетворяет уравнению изгибных колебаний Кирхгофа, которое в полярной системе координат с учетом давлений на пластину акустической среды имеет вид [16, 17]

$$g D_r^2 U(r) - m\omega^2 U(r) = -P(0, r). \quad (3)$$

Здесь D_r^2 – дифференциальный оператор четвертого порядка – композиция двух операторов

$$D_r, \quad D_r^2 = D_r \circ D_r = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \right) \right) \right); \quad g -$$

цилиндрическая жесткость пластины на изгиб, $g = Eh^3 / (12(1 - \sigma^2))$, E – модуль Юнга материала пластины, h – толщина пластины, σ – модуль Пуассона; m – поверхностная плотность пластины, $m = \rho h$, ρ – плотность материала пластины.

При совместных колебаниях пластины и акустической среды выполнено условие неразрывности – равенство смещений пластины и среды при $x = 0$ и $0 \leq r \leq R$:

$$U(r) = \frac{1}{\rho\omega^2} \frac{\partial P(0, r)}{\partial x}, \quad (4)$$

Пластина жестко заделана в стенку волновода: кромка пластины не смещается

$$U(R) = 0, \quad (5)$$

и не поворачивается

$$\frac{dU(R)}{dr} = 0. \quad (6)$$

2. Нормальные волны цилиндрического акустического волновода с жестким корпусом

Рассмотрим безграничный $-\infty < x < +\infty$ цилиндрический волновод радиуса R с жестким корпусом. Волновод заполнен идеальной сжимаемой акустической средой с волновым числом, равным k . В волноводе имеются не взаимодействующие между собой нормальные волны акустического давления [18]. В предположении цилиндрической симметрии волновых процессов в волноводе распределения акустического давления в нормальных волнах $p_n^\pm(x, r)$ при $n = 0, 1, 2, \dots$, имеют вид

$$p_n^\pm(x, r) = A \varphi_n(r) \exp(\pm i k \gamma_n x), \quad (7)$$

A – амплитуда давления нормальной волны; $i^2 = -1$, $\gamma_n = \sqrt{1 - (\mu_n/k)^2}$; $\varphi_n(r)$ – собственная функция оператора D_r , собственное число которой равно $-\mu_n^2$: $D_r \varphi_n(r) = -\mu_n^2 \varphi_n(r)$;

$$\varphi_0(r) = 1, \quad \mu_0 = 0, \quad (8)$$

$\varphi_n(r) = J_0(\mu_n r/R)$, μ_n – пронумерованные в порядке возрастания положительные корни уравнения $J_1(\mu) = 0$ [19]. Функции $\varphi_n(r)$ – распределение акустического давления в нормальных волнах в поперечном сечении волновода $x = \text{const}$.

Нормальная волна $p_n^\pm(x, r)$ является распространяющейся, если $\text{Im} k = 0$, при $k > \mu_n$, и затухающей – при $k < \mu_n$. Частота, на которой имеет место равенство $k = \mu_n$, называется частотой зарождения n -й нормальной волны. Знак плюс в показателе экспоненты соответствует волнам, которые распространяются без затухания в положительном направлении оси OX , а также волнам, затухающим в этом же направлении оси OX . Знак минус в показателе экспоненты – для волн, распространяющихся и затухающих в противоположном направлении.

Волны давления (7) – частные решения уравнения (1), которые удовлетворяют условию (2). С учетом соотношений (8) имеем из формулы (7) для волны давления с нулевым номером $p_0^\pm(x, r) = A \exp(\pm i k x)$, в которой распределение давления постоянно по сечению волновода. Такую волну называют поршневой.

3. Аналитическое решение задачи о колебании пластины при воздействии нормальной волны волновода

Задача (1)-(6) является системой линейных дифференциальных уравнений (1) и (3) с линейными граничными условиями (2), (4)-(6).

Пусть колебания в полубесконечном волноводе (рис. 1) возбуждаются одной из распространяющихся волн с номером l при $k > \mu_l$, набегающей на пластину

$$P_l^{(0)}(x, r) = p_l^-(x, r). \quad (9)$$

Набегая на упругую пластину, волна $P_l^{(0)}(x, r)$, во-первых, приводит её в движение, во-вторых,

отражается от колеблющейся пластины. Отраженное пластиной акустическое поле удовлетворяет принципу предельного поглощения. Согласно этому принципу рассеянное поле состоит из конечного числа распространяющихся нормальных волн $p_n^+(x, r)$ и неоднородных волн, локализующихся вблизи пластины, давление в которых экспоненциально затухает при удалении от пластины [20].

Используя методику решения линейных неоднородных дифференциальных уравнений (ЛНДУ), ищем общее решение $P(x, r)$ уравнения Гельмгольца в виде

$$P(x, r) = P_l^{(0)}(x, r) + P_l(x, r) + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n p_{ln}^+(x, r) \quad (10)$$

где $P_l(x, r)$ – частное решение неоднородной задачи с заданным формулой (9) акустическим полем $P_l^{(0)}(x, r)$, функциональный ряд – общее решение линейного однородного дифференциального уравнения (ЛОДУ).

Общее решение уравнения Кирхгофа $U(r)$ для пластины ищем в виде

$$U(r) = u(r) + u_l(r) + \frac{A}{\omega^2 m} \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \varphi_n(r), \quad (11)$$

где $u(r)$ – общее решение ЛОДУ, $u_l(r)$ – частное решение ЛНДУ с правой частью равной

$$u_l(r) = \frac{2A}{i\omega Z_l} \varphi_l(r).$$

Функциональный ряд в правой части формулы (11) – частное решение ЛНДУ (3), правая часть которого представляет собой ряд $-\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n p_{ln}^+(0, r)$, множитель

$A/(\omega^2 m)$ имеет размерность смещения и обеспечивает безразмерность всем другим величинам, входящим в частное решение.

Коэффициенты α_n и η_n в формулах (10) и (11) – искомые величины.

Частные решения в формулах (10) и (11) ищем в виде $P_l(x, r) = a_l p_l^+(x, r)$, и

$$u_l(r) = \frac{A}{\omega^2 m} v_l \varphi_l(r). \quad (12)$$

Величины a_l и v_l будем искать из системы линейных алгебраических уравнений, которую получим, подставляя частные решения $P_l(x, r)$ и $u_l(r)$ в уравнения (3) и (4):

$$\begin{cases} -a_l + v_l \left(1 - \left(\frac{\mu_l}{\chi} \right)^4 \right) = 1, \\ \frac{a_l}{Z_l^{(w)}} + \frac{v_l}{Z^{(m)}} = \frac{1}{Z_l^{(w)}}, \end{cases} \quad (13)$$

Здесь введены величины: $Z_l^{(w)} = \rho c / \gamma_n$ – входной импеданс волновода для нормальной волны $P_l^{(0)}(x, r)$; $Z^{(m)} = -im\omega$ – импеданс массы [17].

Решение системы (13) имеет вид

$$a_l = 1 - \frac{2Z_l^{(w)}}{Z_l}, \quad (14)$$

$$v_l = \frac{2Z_l^{(m)}}{Z_l}. \quad (15)$$

где χ – волновое число изгибной волны в пластине, $\chi^4 = m\omega^2 R/g$; $Z_l = Z_l^{(w)} + Z_l^{(p)}$,

$$Z_l^{(p)} = Z_l^{(m)} (1 - (\mu_l/\chi)^4),$$

$Z_l^{(p)}$ и Z_l – входные импедансы пластины и акустической системы «волновод с пластиной» для волны $P_l^{(0)}(x, r)$.

С учетом представления (15) для коэффициента v_l запишем частное решение (12) неоднородного уравнения Кирхгофа в виде

$$u_l(r) = \frac{A}{m\omega^2} \cdot \frac{2Z_l^{(m)}}{Z_l} \varphi_l(r). \quad (16)$$

Общее решение однородного уравнения (3) – функцию $u(r)$ – ищем в виде

$$u(r) = \frac{A}{\omega^2 m} \left(C_1 J_0 \left(\frac{\chi r}{R} \right) + C_2 I_0 \left(\frac{\chi r}{R} \right) \right), \quad (17)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. Функции Бесселя J_0 и I_0 – частные линейно независимые решения однородного дифференциального уравнения четвертого порядка (3), непрерывно дифференцируемые в круге $0 \leq r \leq R$. Два других линейно независимых решения уравнения (3) – функции Неймана и Макдональда $N_0(\chi r/R)$ и $K_0(\chi r/R)$ – не обеспечивают непрерывности решения уравнения в центре пластины, поэтому в общем решении (17) опущены. Константы C_1 и C_2 обеспечат удовлетворение краевых условий (5) и (6).

Для нахождения частного решения ЛНДУ (3) учтем, что его правая часть имеет «специальный» вид

$$P(0, r) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n P_n^+(0, r). \quad (18)$$

Частное решение ищем в виде функционального ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \varphi_n(r)$ с неопределенными коэффициентами η_n , который имеет вид «специальной» правой части в уравнении (3).

Справедливость этого утверждения проверяется непосредственной подстановкой частного решения в уравнение (3) с учетом равенства

$$D_r^2 \varphi_n(r) = \mu_n^4 \varphi_n(r).$$

Следует учитывать, что выбор частного решения справедлив при условии $\chi \neq \mu_n$. В противном случае член ряда с номером n будет являться частным решением однородного уравнения (3) и не обеспечит нахождение частного решения ЛНДУ. Поэтому далее будем предполагать, что условие $\chi \neq \mu_n$ выполняется. В окончательных формулах для решения задачи случай $\chi = \mu_n$ получается предельным переходом $\chi \rightarrow \mu_n$.

Отметим, что граничное условие (6) для частного решения $u_l(r)$ и каждого члена ряда в представлении (11) выполнено, так как $\varphi_n'(R) = -J_1(\mu_n) = 0$. Тогда и общее решение должно удовлетворять граничному условию (6), следовательно, имеем $u'(R) = 0$. Из этого требования получим первое уравнение для определения констант общего решения однородного уравнения Кирхгофа

$$-C_1 J_1(\chi) + C_2 I_1(\chi) = 0,$$

которое удовлетворим, если положим $C_1 = C/J_1(\chi)$ и $C_2 = C/I_1(\chi)$, где C – введенная здесь новая константа общего решения. С учетом введенных соотношений для констант общего решения перепишем общее решение $u(r)$ в виде

$$u(r) = C \frac{A}{\omega^2 m} v(r), \quad (19)$$

где используем функцию

$$v(r) = \frac{J_0(\chi r/R)}{J_1(\chi)} + \frac{I_0(\chi r/R)}{I_1(\chi)}.$$

Получим используемое далее разложение функции $v(r)$ в ряд по ортогональному базису, состоящему из функций $\varphi_0(r) = 1$, $\varphi_n(r) = J_0(\mu_n r/R)$ при $n = 0, 1, 2, \dots$

$$v(r) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \varphi_n(r), \quad (20)$$

где

$$q_n = \frac{1}{\delta_n^2} \int_0^R r v(r) \varphi_n(r) dr,$$

δ_n – норма базисного элемента $\varphi_n(r)$,

$$\delta_n^2 = \int_0^R r \varphi_n^2(r) dr.$$

Коэффициенты разложения q_n в представлении (20) вычислим, используя справочные формулы (8.404) и (5.54) [21]. Имеем

$$\delta_n^2 = 0,5 R^2 \varphi_n^2(R), \quad (21)$$

$$q_n = \frac{4}{\chi \varphi_n(R) (1 - (\mu_l/\chi)^4)}. \quad (22)$$

Для вычисления коэффициентов функциональных рядов α_n и η_n в представлениях (10) и (11) подставим в уравнения (3) и (4) ряды, содержащие коэффициенты, а также общее решение из (19) с учетом разложения (20).

Получим уравнения, которые будут содержать функциональные ряды. Ряды в формулах (10) и (11) для искоемых функций, также как ряд для общего решения $u(r)$, заданного формулой (19) с учетом разложения (20), есть разложения искоемых функций по ортогональному базису. Равенства рядов в правой и левой частях полученных уравнений будут выполнены, если равны коэффициенты при одинаковых базисных функциях в разложении по ортогональному базису. Таким образом, получим

системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для искоемых коэффициентов

$$\begin{cases} -\alpha_n + \eta_n (1 - (\mu_l/\chi)^4) = 0, \\ \frac{\alpha_n}{z_n} + \frac{\eta_n}{z^{(m)}} = -\frac{q_n C}{z^{(m)}}, \end{cases} \quad (23)$$

при $n = 0, 1, 2, \dots$

Решив СЛАУ (23) относительно коэффициентов α_n и η_n , найдем общее решение СЛАУ, в котором искоемые коэффициенты выражены через постоянную C

$$\alpha_n = -q_n C \frac{Z_n^{(w)} (1 - (\mu_l/\chi)^4)}{Z_n}, \quad (24)$$

$$\eta_n = -q_n C \frac{Z_n^{(w)}}{Z_n}. \quad (25)$$

С учетом полученного результата (25) для коэффициента η_n получим представление для смещения пластины

$$U(r) = \frac{A}{\omega^2 m} \left(\frac{2Z^{(m)}}{Z_l} \varphi_l(r) + C \sum_{n=0}^{\infty} q_n \frac{Z_n^{(p)}}{Z_n} \varphi_n(r) \right). \quad (26)$$

Построенное общее решение $U(r)$ ЛНДУ (3), содержащее произвольную константу C , удовлетворяет всем условиям задачи, за исключением граничного условия (6).

Используя полученное представление (26), вычислим смещение пластины при $r = R$, тогда из граничного условия (6) получим уравнение для вычисления константы C

$$\frac{2Z^{(m)}}{Z_l} \varphi_l(R) + C \sum_{n=0}^{\infty} q_n \frac{Z_n^{(p)}}{Z_n} \varphi_n(R) = 0.$$

Решив линейное уравнение, находим значение константы

$$C = -\frac{\chi \varphi_l(R) Z_{\Sigma}}{2 Z_l}, \quad (27)$$

где Z_{Σ} – полный импеданс системы «волновод с упругой пластиной» для всех нормальных волн в волноводе

$$\frac{1}{Z_{\Sigma}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{Z_n}. \quad (28)$$

Вычислим значение произведения $q_n C$, используя формулы (22) и (27)

$$q_n C = -\frac{2 \varphi_l(R) Z_{\Sigma}}{\varphi_n(R) Z_l (1 - (\mu_l/\chi)^4)}. \quad (29)$$

Из формул (24) и (25) с учетом соотношения (29) получим для искоемых величин:

$$\alpha_n = \frac{2 \varphi_l(R) Z_n^{(w)} Z_{\Sigma}}{\varphi_n(R) Z_l Z_n}, \quad (30)$$

$$\eta_n = \frac{2 \varphi_l(R) Z_n^{(w)} Z_{\Sigma}}{\varphi_n(R) Z_l Z_n (1 - (\mu_l/\chi)^4)}. \quad (31)$$

Приведем окончательные представления для акустического давления в волноводе и для смещения пластины. Для получения симметричных по индексам l и n формул, что требует принцип

взаимности в акустике [17, 12, 15], заменим ненормированные функции $\varphi_n(r)$ на нормированные $f_n(r) = \sqrt{\gamma_n} \varphi_n(r) / \varphi_n(R)$. При этом распространяющиеся нормальные волны давления в волноводе

$$Q_n^{\pm}(x, r) = A f_n(r) \exp(\pm i \gamma_n x)$$

переносят одинаковые потоки энергии через поперечное сечение волновода.

Имеем с использованием формул (10), (14) и (29) для давления

$$P(x, r) = Q_l^{-}(x, r) + \sum_{n=0}^{+\infty} r_{nl} Q_n^{+}(x, r),$$

где

$$r_{nl} = \delta_{nl} \left(1 - \frac{2Z_l^{(w)}}{Z_l} \right) + \frac{Z_{\Sigma} \sqrt{Z_l^{(w)} Z_n^{(w)}}}{Z_l Z_n}.$$

Используя представление (16) для частного решения $u_l(r)$ и формулу (31) для величины η_n , получим для изгибного смещения пластины представление в виде функционального ряда Фурье по ортогональному базису, состоящему из функций $\varphi_n(r)$

$$U(r) = u_l(R) \left(\frac{f_l(r)}{f_l(R)} - Z_{\Sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{Z_n} \frac{f_n(r)}{f_n(R)} \right). \quad (32)$$

Отметим, что каждое слагаемое в представлении (32) удовлетворяет граничному условию (6), но условию (5) удовлетворяет только функция $U(r)$ из (32), благодаря выбору значения константы C в представлении (27).

После элементарных преобразований ряд Фурье для смещения $U(r)$ в формуле (32) преобразуем к функциональному ряду

$$U(r) = u_l(R) \sum_{n=1}^{\infty} w_n \psi_n(r). \quad (33)$$

Ряд представляет разложение смещения пластины по не ортогональному базису, состоящему из функций

$$\psi_n(r) = 1 - \frac{f_n(r)}{f_n(R)},$$

В представлении (33) введены комплексные величины w_n – коэффициенты разложения по базису $\psi_n(r)$ нормированного смещения пластины $U(r)/u_l(R)$

$$w_n = \frac{Z_{\Sigma}}{Z_n} - \delta_{ln}, \quad (34)$$

где $\delta_{ll} = 1$, $\delta_{ln} = 0$.

Непосредственно проверяется, что $\psi_n(R) = 0$ и $\psi_n'(R) = 0$, поэтому каждый член ряда в формуле (33) удовлетворяет граничным условиям (5) и (6) на кромке пластины.

4. Исследование смещения пластины

Расчеты проводись при следующих параметрах задачи: цилиндрический волновод, радиус которого $R = 1$ м, заполнен водой (объемная плотность

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c = 1500 \text{ м/с}$, пластина стальная (объемная плотность – 7800 кг/м^3 , толщина – 0.01 м , модуль Юнга $E = 1.96 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$, модуль Пуассона $\sigma = 0,3$).

В качестве акустического поля, возбуждающего колебания в волноводе, выбрана поршневая волна $P_1^{(0)}(x) = A \exp(-ikx)$, набегающая на пластину.

На рис. 2 показан график зависимости от безразмерной частоты $\Omega = kR$ функции $y = Z_\Sigma / Z_0$, входящей в формулу (33) для коэффициентов возбуждения форм колебания пластины. Здесь выделены: частоты совпадения (alignment) – $\Omega_1^a, \Omega_2^a, \Omega_3^a$, на которых полный импеданс системы $Z_\Sigma = 0$; и резонансные (resonance) частоты – $\Omega_1^r, \Omega_2^r, \Omega_3^r$, на которых $\text{Im} Z_\Sigma = 0$, $\text{Re} Z_\Sigma$ имеет max.

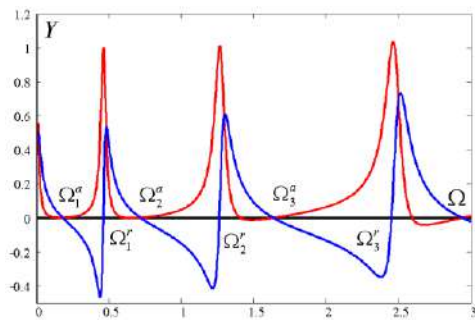


Рис. 2. Зависимость от безразмерной частоты Ω реальной части (красная линия) и мнимой части (синяя линия) полного импеданса системы Z_Σ

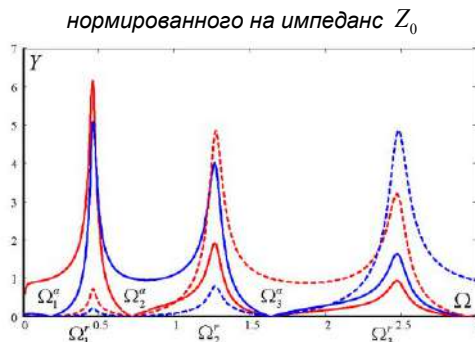


Рис. 3. Зависимость от безразмерной частоты Ω модуля w_n – коэффициента разложения по базису $\psi_n(r)$ нормированного смещения пластины $U(r)/u_1(R)$: $n = 1$ – красная сплошная линия, $n = 2$ – синяя сплошная линия, $n = 3$ – красная штриховая линия, $n = 4$ – синяя штриховая линия

Результаты численных расчетов по формуле (34) зависимости модуля коэффициентов возбуждения w_n от безразмерной частоты $\Omega = kR$ показаны на рис. 3. На резонансных частотах Ω_n^r поведение модулей коэффициентов возбуждения w_n имеет резонансный характер – они имеют максимальные значения. На частотах совпадения Ω_n^a форма колебания пластины совпадает с распределением

давления $\varphi_n(r)$, а модули коэффициентов возбуждения w_n прочих форм равны 0.

На рис. 4 показаны результаты расчетов по формуле (33) распределения смещений пластины $Y(r/R) = |U(r)/u_1(R)| \cdot \text{sign}(\sin \theta)$ на частотах Ω возбуждения колебаний в волноводе с учетом изменения фазы колебаний θ на величину π на соседних участках пластины около узловых линий, на которых смещение пластины равно нулю.

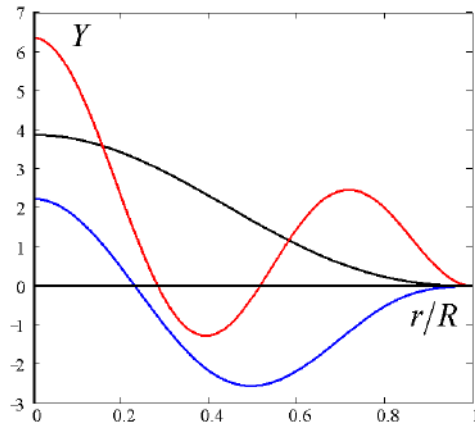


Рис. 4. Распределения смещения пластины, возбуждаемые поршневой волной на частотах возбуждения $\Omega = 0, 2, 3$ (черная линия); $\Omega = 0, 90$ (синяя линия); $\Omega = 1, 50$ (красная линия)

Анализ зависимостей на рисунках 2 и 3 показывает, что с увеличением частоты возбуждения меняются соотношения модулей коэффициентов w_n : на самых низких частотах наибольшие значения имеет величина $|w_1|$, затем наибольшей становится величина $|w_2|$ и т.д. Соответственно на низких частотах форма колебания пластины в основном определяется формой $\psi_1(r)$, которая не имеет узлов, затем определяющей становится форма $\psi_2(r)$ и т. д.

Заключение

Анализ численных результатов показывает, что наличие сжимаемой среды существенно влияет на форму колебаний упругой пластины.

Во-первых, взаимодействие колеблющейся акустической среды с упругой пластиной имеет резонансный характер, имеет место значительное увеличение амплитуды колебаний пластины на дискретном наборе частот, названных резонансными.

Во-вторых, совместное колебание пластины и акустической среды приводит к существенному различию формы колебания пластины и формы распределения давления в среде. Вдали от пластины в волноводе распределение давления определяется наличием распространяющихся нормальных волн, неоднородные волны в волноводе здесь экспоненциально затухают. На форму колебания пластины влияют все нормальные волны волновода, как распространяющиеся, так и неоднородные. Это приводит к увеличению

количества узловых линий в распределении смещения пластины.

Литература

1. Ingard U. Transmission of sound a stretched membrane. JASA, 1954, Vol. 26. P. 99-102.
2. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. Т.2. М.: Изд. ИЛ, 1960. 886 с.
3. Лейбензон Л.С. О натуральных периодах колебания плотины, подпирающей реку. Сборник трудов. Т.1 Теория упругости. М.: Изд. АН СССР, 1951. С. 157-161.
4. Romilly N. Sound transmission through a thin plate under tension. Acustica, 1969, 1970, V. 22, № 3. P. 183-186.
5. Romilly N. Exact solution for guided sound transmission through a simply supported plate. Acustica, 1973, V. 28, № 4. P. 234-237.
6. Sewell E. C. Exact solution for transmission of reverberant sound through a circular panel in a waveguide. Journal of Sound and Vibration. 1970, Vol. 12. P. 397-409.
7. Milly N. R. Exact solution for guided sound transmission through a simply supported plate. Acustica. 1973, Vol. 28. P. 234-237.
8. Romilly N. Exact solution for guided sound transmission through a double partition. Journal of Sound and Vibration. 1976, Vol. 48, № 2. P 243-249.
9. Коузов Л.П., Пачин В.А. О дифракции акустических волн в плоском полубесконечном волноводе с упругими стенками. Прикладная математика и механика. 1976, Т. 40, № 1, С. 104-111.
10. Коузов Д.П., Никитин Г.Л. О прохождении акустических волн сквозь тонкую перегородку в цилиндрическом волноводе. Вестник Ленинградского университета. 1984, № 4. С. 24-30.
11. Kouzov D.P. Boundary-contact problems of acoustics and methods of factorisation. Methoden und Verfahren der Mathematische Physik. 1997, Bd. 42. P. 102-113.
12. Лукьянов В.Д., Никитин Г.Л. О резонансном рассеянии нормальных волн мембраной в акустическом волноводе. Акустический журнал. 1996, Т. 42, № 5. С. 653-660.
13. Toyoda H., Yayek S. Attenuation of acoustic waves by composite plates. Journal of Sound and Vibration. 1971, Vol. 14, № 1, P.103-113.
14. Борисов Л.П., Гужас Д.Р. Звукоизоляция в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 254 с.
15. Лукьянов В.Д., Никитин Г.Л. Рассеяние акустических волн на упругой пластине, разделяющей две различные жидкости в волноводе. Акустический журнал. 1990, Т. 36, № 1. С. 68-75.
16. Стрэтт Дж. В. (Лорд Рэлей) Теория звука. М.-Л., ГИТТЛ. 1940, Т. 1. 499 с.
17. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л., Судостроение, 1972, 352 с.
18. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
19. Янке Е, Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. М.: Наука, 1977, 344 с.
20. Бабич В.М., Капилевич М.Б., Михлин С.Г. и др. Справочная математическая библиотека. Линейные уравнения математической физики. М.: Наука, 1964, 368 с.
21. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Наука, 1971, 1108 с.

References

1. Ingard U. Transmission of sound a stretched membrane. JASA, 1954, Vol. 26. P. 99-102.
2. Mors F.M., Feshbah G. Metody teoreticheskoy fiziki. T.2. [Methods of theoretical physics. v.2]. M.: Izd. IL, 1960. 886 s.
3. Lejbenzon L.S. O natural'nyh periodah kolebaniya plotiny, podpirayushchej reku [About natural periods of oscillation of the dam supporting the river]. Sbornik trudov. T.1 Teoriya uprugosti. M.: Izd. AN SSSR, 1951. S. 157-161.
4. Romilly N. Sound transmission through a thin plate under tension. Acustica, 1969, 1970, V. 22, № 3. P. 183-186.
5. Romilly N. Exact solution for guided sound transmission through a simply supported plate. Acustica, 1973, V. 28, № 4. P. 234-237.
6. Sewell E. C. Exact solution for transmission of reverberant sound through a circular panel in a waveguide. Journal of Sound and Vibration. 1970, Vol. 12. P. 397-409.
7. Milly N. R. Exact solution for guided sound transmission through a simply supported plate. Acustica. 1973, Vol. 28. P. 234-237.
8. Romilly N. Exact solution for guided sound transmission through a double partition. Journal of Sound and Vibration. 1976, Vol. 48, № 2. P 243-249.
9. Kouzov L.P., Pachin V.A. O difrakcii akusticheskikh voln v ploskom polubeskonechnom volnovode s uprugimi stenkami. Prikladnaya matematika i mekhanika [About diffraction of acoustic waves in a flat semi-infinite waveguide with elastic walls]. 1976, T. 40, № 1, S. 104-111.
10. Kouzov D.P., Nikitin G.L. O prohozhdenii akusticheskikh voln skvoz' tonkuyu peregorodku v cilindricheskom volnovode [About the passage of acoustic waves through a thin partition in a cylindrical waveguide]. Vestnik Leningradskogo universiteta. 1984, № 4. S. 24-30.
11. Kouzov D.P. Boundary-contact problems of acoustics and methods of factorisation. Methoden und Verfahren der Mathematische Physik. 1997, Bd. 42. P. 102-113.
12. Luk'yanov V.D., Nikitin G.L. O rezonansnom rasseyanii normal'nyh voln membranoy v akusticheskom volnovode [About resonance scattering of normal waves by membrane in acoustic waveguide]. Akusticheskij zhurnal. 1996, T. 42, № 5. S. 653-660.
13. Toyoda H., Yayek S. Attenuation of acoustic waves by composite plates. Journal of Sound and Vibration. 1971, Vol. 14, № 1, P.103-113.

14. Borisov L.P., Guzhas D.R. Zvukoizolyaciya v mashinostroenii [Sound insulation in mechanical engineering]. M.: Mashino-stroenie, 1990. 254 s.
15. Luk'yanov V.D., Nikitin G.L. Rasseyaniye akusticheskikh voln na uprugoj plastine, razdelyayushchej dve razlichnye zhidkosti v volnovode [Scattering of acoustic waves on an elastic plate separating two different liquids in the waveguide]. Akusticheskij zhurnal. 1990, T. 36, № 1. S. 68-75.
16. Strett Dzh. V. (Lord Relej) Teoriya zvuka [Sound theory]. M. L., GITTL. 1940, T. 1. 499 s.
17. Shenderov E.L. Volnovye zadachi gidroakustiki [Wave problems of hydroacoustics]. L., Sudostroenie, 1972, 352 s.
18. Isakovich M.A. Obshchaya akustika [General acoustics]. M.: Nauka, 1973. 496 s.
19. Yanke E, Emde F., Lyosh F. Special'nye funkicii. Formuly, grafiki, tablicy [Special functions. Formulas, graphs, tables]. M.: Nauka, 1977, 344 s.
20. Babich V.M., Kapilevich M.B., Mihlin S.G. i dr. Spravochnaya matematicheskaya biblioteka. Linejnye uravneniya matematicheskoy fiziki [Reference mathematical library. Linear equations of mathematical physics]. M.: Nauka, 1964, 368 s.
21. Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvede-nij [Tables of integrals, sums, series and products]. M., Nauka, 1971, 1108 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Дмитриевич Лукьянов, доктор физико-математических наук, профессор, ученый секретарь, ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72, e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

Valeriy D. Lukyanov, Dr. (Phys & Math), Professor, Scientific Secretary, Joint-stock company «Avangard», Kondrat'evsky, 72, St. Petersburg, 195271, Russian Federation, e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

Людмила Васильевна Носова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры математики, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская наб., 13, e-mail: lvn1201@gmail.com

Lyudmila V. Nosova, Ph.D. (Phys & Math), senior fellow, assistant professor of the Department of mathematics, Mozhaisky Military Space Academy, Zhdanovskaya, 13, St. Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: lvn1201@gmail.com

Герман Андреевич Лебедев, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, Санкт-Петербургский морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: office@smtu.ru

German A. Lebedev, Dr. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department of physics, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: office@smtu.ru

Сергей Владимирович Попков, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: krylov@ksrc.ru

Sergey V. Popkov, Dr. Sci. (Eng), senior fellow, head of laboratory, Krylov State Research Centre, Moscow highway, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: krylov@ksrc.ru

Поступила в редакцию: 28.05.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 537.84

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.033>

О действии индуцированного в морской воде электромагнитного поля, на находящееся в ней заряженное тело

С.Ю. Маламанов¹ e-mail: stevmal@mail.ru, В.А. Павловский² e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Электромагнитное поле Мирового Океана представляет собой совокупность полей различного происхождения, обусловленных как внешними, так и внутренними источниками. Внешними источниками являются электромагнитные процессы в атмосфере, ионосфере и магнитосфере, внутренние источники – это разнообразные гидродинамические движения как естественного (различные волновые движения), так и искусственного происхождения, вызванные движением кораблей, как по поверхности водного пространства, так и внутри него. Динамика совместного взаимодействия жидкости с находящимися в ней твёрдыми телами является одной из фундаментальных и классических проблем механики, физики и прикладной математики. Результаты, полученные при исследовании этой проблемы, имеют существенное прикладное значение для различных задач естествознания и техники, включая и новейшие технологические процессы. Современные вычислительные средства с помощью новейших компьютерных систем дают возможность физически правильного описания движения твёрдого тела, как в жидкой среде, так и на границе раздела сред, например, «газ–жидкость». Всё это в равной степени относится и к постановке сопряжённых задач, приводящих к силовому взаимодействию среды и твёрдого тела. Во многих задачах прикладной гидрофизики рассматриваются движения проводящих сред, находящихся в магнитном поле. 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.

В предлагаемой статье показано, что индуцируемое в морской воде электромагнитное поле, обусловленное движением в ней заряженного тела, оказывает силовое воздействие на само тело. Для расчета параметров индуцированного 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.

On the action of an electromagnetic field induced in seawater on a charged body in it

Stepan Y. Malamanov¹ e-mail: stevmal@mail.ru, Valery A. Pavlovsky² e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com¹ Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov, ² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The electromagnetic field of the World Ocean is a set of fields of various origins, caused by both external and internal sources. External sources are electromagnetic processes in the atmosphere, ionosphere and magnetosphere, internal sources are various hydrodynamic motions of both natural (various wave motions) and artificial origin, caused by the movement of ships, both on the surface of water space and inside it. The dynamics of the joint interaction of a fluid with solids in it is one of the fundamental and classical problems of mechanics, physics and applied mathematics. The results obtained in the study of this problem are of significant applied value for various problems of natural science and technology, including the latest technological processes. Modern computing means with the help of the latest computer systems make it possible to physically correctly describe the motion of a solid, both in a liquid medium and at the interface between media, for example, "gas-liquid". All this applies equally to the formulation of conjugate problems that lead to the force interaction of a medium and a solid. In many problems of applied hydrophysics, the motion of conducting media in a magnetic field is considered. It should be borne in mind that the complex nature of the interaction of hydrodynamic and electromagnetic fields necessitates the consideration of rather simplified models describing the basic laws of the studied phenomena.

The proposed article shows that the electromagnetic field induced in seawater, caused by the movement of a charged body in it, exerts a force effect on the body itself. To calculate the parameters of the induced 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.

В настоящей работе изучается модельная задача о колебаниях заряженного твёрдого тела – шара – в приповерхностном слое проводящей жидкости – морской воды. Модельность постановки позволяет достаточно свободно выбирать определяющие параметры и разумно варьировать их значениями.

Моделирование колебаний заряженного шара

Часть расчётной области, представляющая собой куб, показана на рисунке 1.

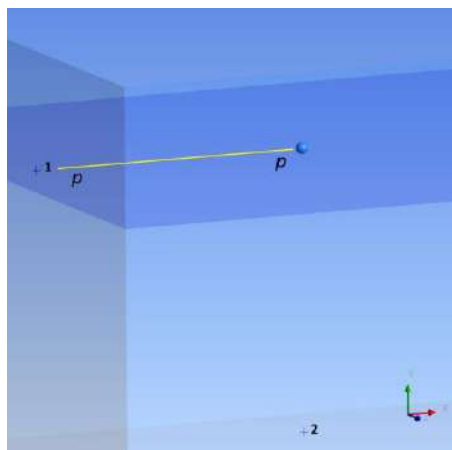


Рис. 1. Схема расчётной области

На нём виден шар (его диаметр $D = 0.5$ м) и свободная поверхность. Шар плотностью 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 H_c , а по оси абсцисс – время t .

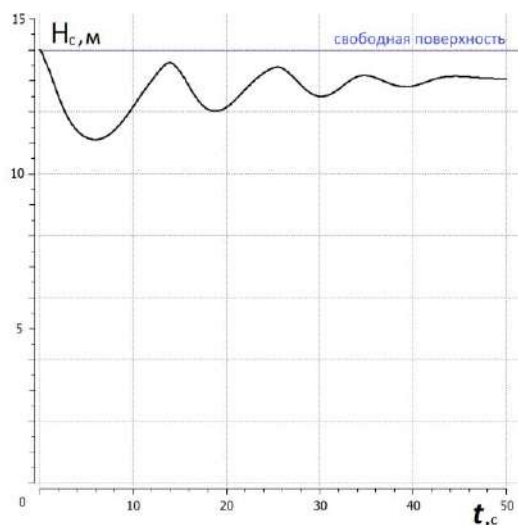


Рис. 2. Изменение положения центра масс шара в случае затухающих колебаний

Это также видно на фазовой диаграмме, приведенной на рисунке 3.

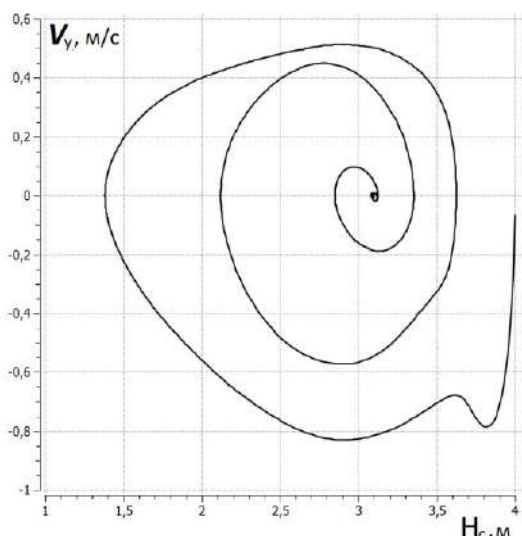


Рис. 3. Фазовая диаграмма движения центра масс шара в случае затухающих колебаний

По оси ординат отложена вертикальная скорость центра масс шара – V_y . Из анализа этих рисунков видно, что со временем шар приходит в состояние равновесия, расположенное на некоторой глубине, что адекватно физике рассматриваемого явления.

В случае движения заряженного шара, в окружающем пространстве – морской воде – генерируется индуцируемое электромагнитное поле [1-4]. Для моделирования этого процесса необходимо решать нестационарные уравнения магнитной гидродинамики.

Индуцированное магнитное поле является следствием колебательного движения заряженного шара. Для пояснения этого, обратимся к рисунку 3,

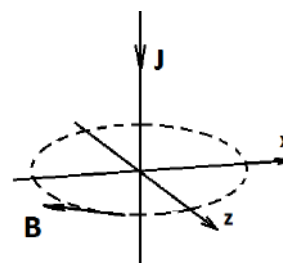


Рис. 3. Магнитное поле прямолинейного тока

на котором схематически показан бесконечный прямой провод, с постоянным током 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.

Потенциал шара поддерживался постоянным 200 В, коэффициент электропроводности морской воды принимался 5 См/м.

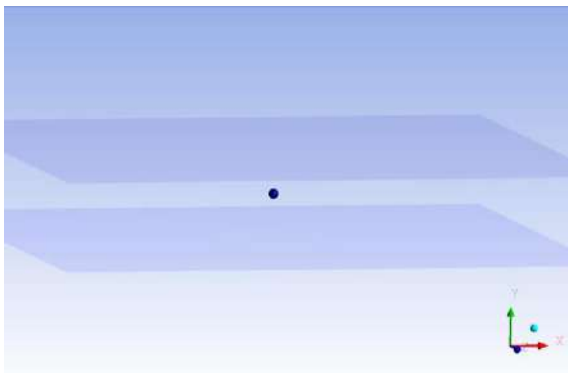


Рис. 4. Вспомогательные плоскости, на которых строятся характеристики электромагнитного поля

Для отображения характеристик магнитного поля необходимо сделать построение вспомогательных плоскостей, на которых и будут показаны распределения индуцируемого магнитного поля. Эти плоскости показаны на рисунке 4. На рисунке 5 показано распределение вектора индукции индуцированного магнитного поля выше погружающегося шара (верхняя плоскость на рисунке 4).

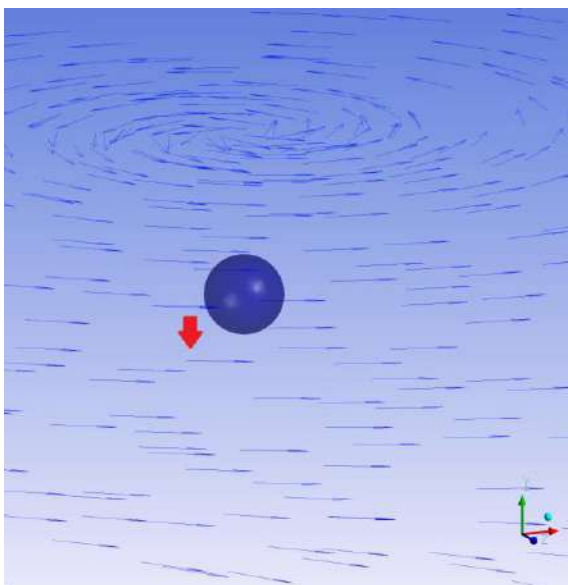


Рис. 5. Индуцированное магнитное поле (верхняя плоскость на рисунке 4)

На рисунке 6 показано распределение вектора индукции индуцируемого магнитного поля ниже шара (нижняя плоскость на рисунке 4).

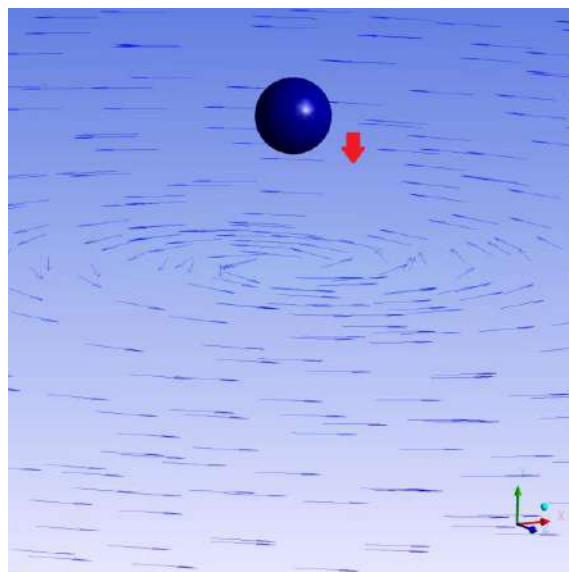


Рис. 6. Индуцированное магнитное поле (нижняя плоскость на рисунке 4)

Из этих рисунков, хорошо видно, что линии индукции индуцированного магнитного поля представляют собой концентрические окружности в плоскостях, перпендикулярных направлению перемещения шара. Это обстоятельство вполне соответствует тому, что было отмечено о магнитном поле, окружающем прямолинейный ток.

Помимо магнитного поля, в окружающем пространстве индуцируется и электрическое поле. Распределение модуля напряжённости последнего, в непосредственной окрестности шара в момент времени $t = 6$ с, приведено на рисунке 6.

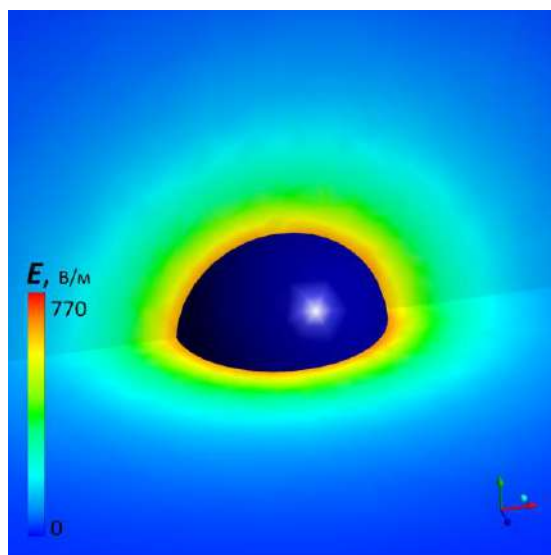


Рис. 6. Изменение индуцированного электрического поля

Распределение построено на двух взаимно перпендикулярных плоскостях симметрии, проходящих через центр шара: **XOY** и **ZOY**.

Помимо силовой, следует рассмотреть изменение во времени энергетической характеристики электрического поля – потенциала. Для этого необходимо сделать дополнительное построение. Оно показано на рисунке 7: две точки

«наблюдения» расположены на одной горизонтали на равных расстояниях от центра масс шара, опускающегося вниз в момент времени $t = 6$ с.

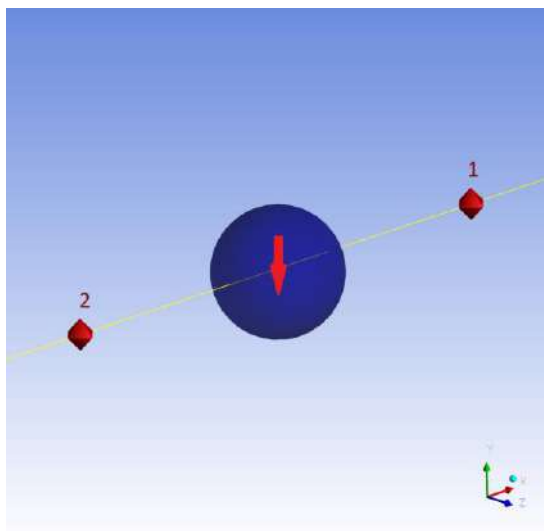


Рис. 7. Вспомогательные точки, в которых рассматривается изменения потенциала электрического поля

Соответствующие кривые поведения потенциала в точках 1 и 2 представлены на рисунке 8.

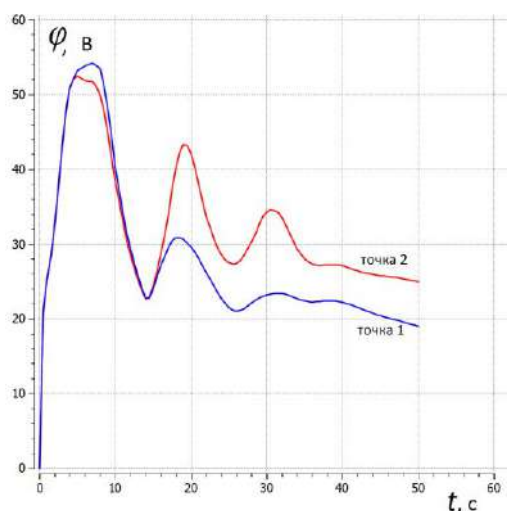


Рис. 8. Изменение потенциала индуцированного электрического поля в точках «наблюдения»

Анализ последнего рисунка позволяет сделать, по меньшей мере, два основных вывода: во-первых, по разные стороны от движущегося вниз шара изменение потенциала на начальном этапе происходит синфазно и одинаково, во-вторых – после момента времени $t = 14$ с, при сохранении синфазности, наблюдается различие в значении потенциала в точках 1 и 2. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, его можно трактовать как «уход шара в сторону» при его погружении и таким образом влияющим на индуцированное электрическое поле. Одна из причин этого «вскрывается» при рассмотрении распределение составляющей напряжённости электрического поля в направлении оси X в

непосредственной окрестности шара в момент времени $t = 6$ с на тех же плоскостях симметрии, что и на рисунке 9.

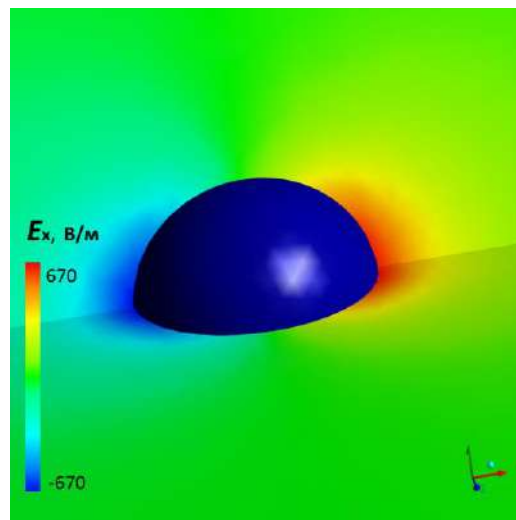


Рис.9. Изменение X- составляющей индуцированного электрического поля

Хорошо видно, что существует градиент электрического поля в «поперечном» направлении. Именно этот градиент вместе с индуцированным магнитным полем приводит силовому воздействию на заряженный шар. Ещё одной возможной причиной «ухода» шара является его вращение – как тела конечных размеров – вокруг собственной оси, приводящее к кориолисову ускорению. При этом, сила Архимеда в определённой мере уменьшает вес шара и как следствие его инертные свойства, поэтому достаточно малого воздействия, приводящего к движению в «поперечном» направлении.

Представляет интерес рассмотрение описанных процессов при изменении потенциала шара, в частности его увеличения. При последующих расчётах потенциал шара равен 300 В. На рисунках 10 и 11 представлены графики, иллюстрирующие влияние заряда шаре его движение.

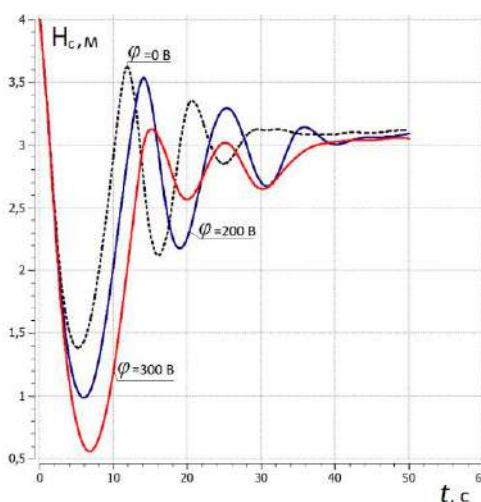


Рис. 10. Изменение положения центра масс шара, при различных значениях его потенциала

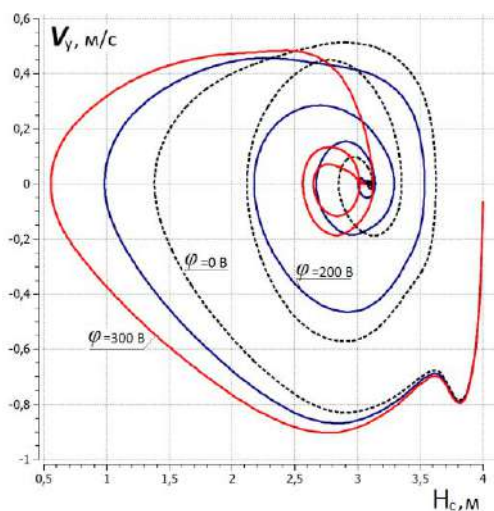


Рис. 11. Фазовая диаграмма движения центра масс шара, при различных значениях его потенциала

Из этих графиков следует, что увеличение потенциала шара увеличивает размах колебаний, кроме того усиливается (увеличивается) индуцируемое электромагнитное поле. В качестве примера на рисунке 12 приведено сравнения изменения потенциала в описанной ранее точке 1 (см. рисунок 7), при двух различных значениях потенциала шара в полтора раза, значении потенциала индуцируемого в среде электрического поля увеличивается в два раза.

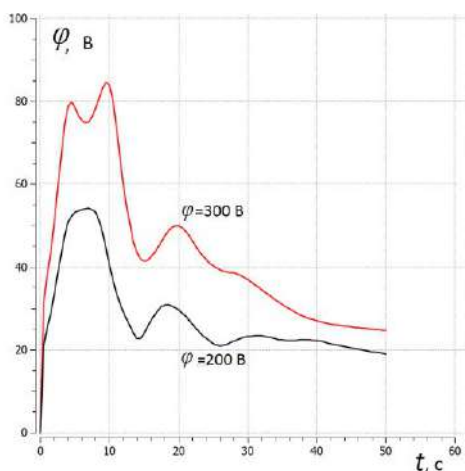


Рис.12. Изменение потенциала индуцированного электрического поля в точке 1

Следовательно, можно заключить, что движение заряженного тела в проводящей среде приводит к генерации индуцированного электромагнитного поля, которое в свою очередь воздействует на само тело и приводит к существенному отклонению от начального положения. Для иллюстрации этого на рисунке 13 приведена траектория движения шара в вертикальной плоскости YOZ.

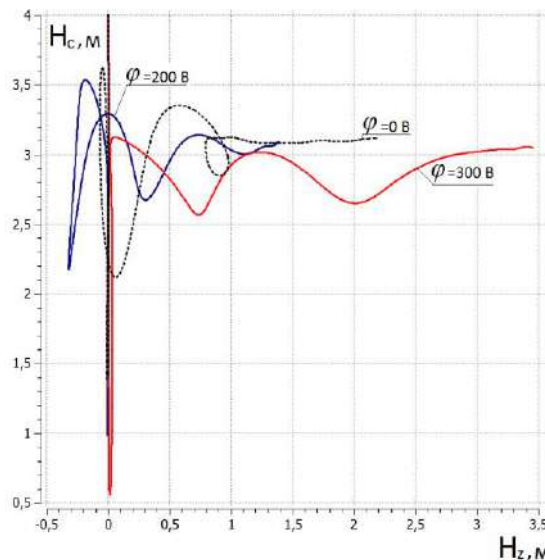


Рис. 13. Траектория движения центра масс шара в вертикальной плоскости YOZ, при различных значениях его потенциала

Здесь по оси абсцисс отложено расстояние, проходимое центром масс шара, вдоль оси Z – H_z.

Заключение

Проведённые расчёты показали, что колебательное движение заряженного шара генерирует в окружающей морской воде индуцированное электромагнитное поле, которое в свою очередь оказывает действие на сам шар. Таким образом, можно говорить о наличии обратной связи.

Литература

1. Бычков В.С., Жмур В.В., Лапшин В.Б. Об электромагнитных эффектах при колебании заряженной поверхности моря // Геомагнетизм и аэронавигация. 1979. №4т. XIX 2020, С.762 – 764.
2. Семкин С.В., Смагин В.П., Савченко В.Н. Генерация возмущений магнитного поля при подводном взрыве// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. №1. – С. 138 – 141.
3. Жмур В.В. О вариациях электромагнитных полей, индуцированных океаническими движениями синоптического масштаба // Геомагн. и аэронавигация. 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. Bychkov V.S., Zhmur V.V., Lapshin V.B. Ob elektromagnitnykh effektakh pri kolebanii zaryazhennoy po-verkhnosti moray (On electromagnetic effects during oscillation of the charged surface of the sea // Geomagnetism and Aeronomy) // Geomagnetizm i aeronomiya. 1979. №4t.XIX 2020, S.762 – 764/.
2. Semkin S.V., Smagin V.P., Savchenko V.N. Generatsiya vozmushcheniy magnitnogo polya pri podvodnom vzryve (Generation of magnetic field perturbations in an underwater explosion // Izvestiya RAN) // Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2010. T. 46. №1. – S. 138 – 141.
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. – Vladivostok: 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: 14.07 2021

Принята к публикации: 15.09.2021

УДК 534.2.231

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.035>

Изучение связи между дисперсионными искажениями импульсных сигналов и акустическими свойствами дна мелкого моря

А.Л. Боран-Кешишьян¹ e-mail: aumsu.stcw@gmail.com, В.А. Лисютин² e-mail: vlisiutun@mail.ru,
Ж.В. Маленко³ e-mail: zhvla17@mail.ru, А.А. Ярошенко^{2,3} e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

¹Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,

²Севастопольский государственный университет,

³Филиал Государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова в г. Севастополь

Аннотация. Для установления связи между дисперсионными искажениями сигналов и акустическими характеристиками дна мелкого моря применяется метод свертки сигнала с импульсной характеристикой волновода. Методом нормальных волн вычисляется акустическое поле в широкой полосе частот. Затем осуществляется обратное преобразование Фурье акустического поля и восстанавливается импульсная характеристика волновода. Реплика сигнала далее вычисляется как свертка импульсной характеристики и сигнала. Преимущества такого подхода следующие. Свертка циклична – нет ограничений на длительность сигнала. Может быть использована не только вычисленная, но и экспериментально определенная импульсная характеристика. По усмотрению исследователя поля отдельных мод можно исключать, добавлять шум в частотной либо временной области, имитировать движение источника, воздействие ветрового волнения. Ограничение – условия однородности волновода вдоль трассы. Рассматривается ряд примеров, в которых изучается возможность определения акустических свойств дна, изучаются дисперсионные искажения сигналов, возникающие в волноводе со слоем скачка скорости звука на профиле скорости звука. Изучается изменение дисперсионных искажений в зависимости от частоты сигнала, глубины приемника, расстояния между излучателем и приемником.

Ключевые слова: гидроакустический волновод, метод нормальных волн, волноводная дисперсия, акустические свойства дна, распространения импульсных сигналов, дисперсионные искажения.

Study of the relationship between dispersion distortions of impulsive signals and acoustic properties of the shallow sea bottom

Anastas L. Boran-Keshishyan¹, e-mail: Aumsu.stcw@gmail.com, Victor A. Lisyutin², e-mail: vlisiutun@mail.ru,
Zhanna V. Malenko³ e-mail: zhvla17@mail.ru, Alexander A. Yaroshenko^{2,3} e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, ²Sevastopol State University,

³Sevastopol Branch of the Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. To establish a connection between the dispersion distortions of signals and the acoustic properties of the shallow sea bottom, the method of convolution of the signal with the impulse response of the waveguide is used. The method of normal modes calculates the acoustic field in a wide frequency band. Then the inverse Fourier transform of the acoustic field is performed and the impulse response of the waveguide is restored. The signal replica is then calculated as a convolution of the impulse response and the signal. The advantages of this approach are as follows. Convolution is cyclical – there are no restrictions on the duration of the signal. Not only calculated, but also experimentally determined impulse response can be used. At the discretion of the researcher, the fields of individual modes can be excluded, add noise in the frequency or time domain, simulate the movement of the source, the impact of wind waves. Restriction - conditions for uniformity of the waveguide along the distance. A number of examples are considered, in which the possibility of determining the acoustic properties of the bottom is studied, as well as dispersion distortions of signals that occur in a waveguide with a sound velocity jump layer on the sound velocity profile. The variation of dispersion distortions is studied depending on the signal frequency, receiver depth, and distance between the emitter and receiver.

Key words: hydroacoustic waveguide, normal mode method, waveguide dispersion, acoustic properties of the bottom, propagation of impulsive signals, dispersion distortion of signals.

Введение

Для морского шельфа характерен широкий диапазон глубин, от единиц до сотен метров [1]. С точки зрения акустики, шельф представляет собой волновод, ограниченный сверху свободной, полностью отражающей поверхностью, снизу – частично отражающим дном. Вычисление звуковых полей, создаваемых излучателями расположенными внутри водного слоя шельфа, необходимо при решении задач инверсий свойств дна [1], геофизики [2], экологии [3], военных технологий поиска подводных объектов и звукоподводной связи [4].

Условия распространения звука в волноводе шельфа определяются двумя конкурирующими факторами: профилем скорости звука (ПСЗ) в

водном слое и акустическими свойствами слоистого дна [1]. На шельфе с глубинами десятки или сотни метров, в диапазоне средних частот (сотни герц) преимущественное влияние может оказывать ПСЗ, если на нем есть выраженный минимум. В случае глубин единицы или десятки метров, т.е., когда толщина водного слоя сопоставима с длиной звуковой волны, а ПСЗ практически постоянен, главное влияние будет оказывать дно. Сказанное выше особенно актуально для северо-западной части шельфа Черного моря, где минимум на ПСЗ располагается на небольших, 50 – 60 м глубинах.

Расчеты тональных звуковых полей в настоящее время хорошо разработаны. В зависимости от свойств волновода применяются методы:

нормальных волн, параболического уравнения, лучевой [5, 10].

Вычисление импульсных полей является значительно более сложной задачей. В условиях глубокого моря, океана, с сильным подводным звуковым каналом (ПЗК) дно и поверхность слабо влияют на распространение звука, и поле импульсного источника расположенного на оси канала определяется в рамках лучевой приближения без учета дисперсии. В этом случае реплики сигнала представляют собой ослабленные, накладывающиеся друг на друга, запаздывающие соответственно импульсной характеристике канала, но неискаженные копии исходного сигнала. Так проявляется многолучевой характер распространения [6].

В условиях мелкого моря применяются исключительно волновые расчеты, чаще всего метод нормальных мод.

Обычно, моделирование импульсного поля осуществляется по стандартной вычислительной схеме: прямое фурье-преобразование сигнала; расчет акустического поля в полосе частот источника; перемножение спектра сигнала с акустическим полем в частотной области; обратное фурье-преобразование [5].

Недостаток такого подхода в следующем. Перемножаемые массивы должны иметь одинаковую размерность, поэтому ограниченный набор сигналов ограниченной длительности алгоритмически встраивается в вычислительную программу, что лишает исследователя необходимого ему произвола для выбора сигналов для решения разнообразных задач акустики шельфа.

Целью статьи является представление и апробация иного подхода к восстановлению импульсного сигнала, суть которого в следующем. Каким-либо волновым методом вычисляется акустическое поле в широкой полосе частот. Затем осуществляется обратное преобразование Фурье акустического поля и восстанавливается импульсная характеристика (ИХ) волновода. Реплика волновода на сигнал с любым видом модуляции вычисляется далее как свертка сигнала с импульсной характеристикой.

Поскольку сигнал и волновод являются отдельными объектами, «сверточный» метод не имеет перечисленных выше недостатков. Свертка циклична – нет ограничений на длительность сигнала. Может быть использована не только вычисленная, но и экспериментально определенная ИХ [6]. По усмотрению исследователя поля отдельных мод можно исключать, добавлять шум в частотной либо временной области, имитировать движение источника, воздействие ветрового волнения. Единственное ограничение – условие однородности волновода вдоль трассы.

1. Постановка задачи. Вычисление импульсной характеристики волновода

Рассмотрим на рис.1 модель горизонтально-слоистого гидроакустического волновода с глубиной водного слоя h , произвольным ПСЗ $c_1(z)$, плотность воды ρ_1 – постоянна, источник – на глубине z_s , приемник – на глубине z , расстояние между источником и приемником – r . Акустические свойства промежуточного слоя дна зависят от глубины и

частоты [7,8]. Скорость звука в слое $c_2(z, f)$, тангенс потерь $\gamma_2(z, f)$, плотность ρ_2 постоянна. Полупространство «Н» с постоянными акустическими характеристиками: c_H, ρ_H, γ_H . Циклическая частота $\omega = 2\pi f, f, \Gamma$.

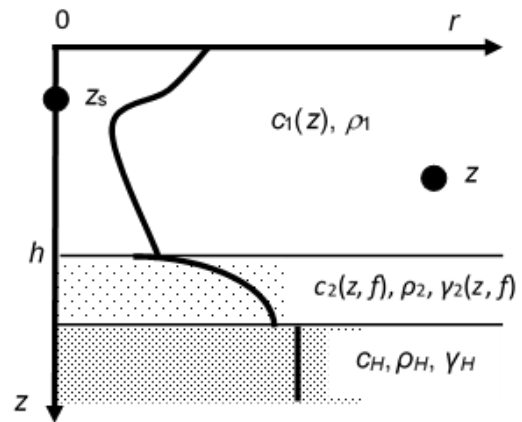


Рис. 1. Модель волновода

Функция $p(r, z, \omega)$ описывает поле давления в водном слое и удовлетворяет неоднородному уравнению Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = -\frac{1}{r} \delta(r) \delta(z - z_s), \quad (1)$$

где $k_1 = \omega / c_1(z)$ – акустическое волновое число. После разделения переменных в (1) поле представляется в виде суммы мод:

$$p(r, z, \omega) = \sum_{l=1}^{\infty} Q_l(z_s, \omega) \varphi_l(z, \omega) H_0^{(1)}(\omega, r) \quad (2)$$

Q_l – коэффициент возбуждения моды с номером l , $H_0^{(1)}(\omega, r)$ – функция Ханкеля, $\varphi_l(z, \omega)$ – функции вертикальных профилей мод, определяемые из уравнения

$$\frac{d^2 \varphi_l(z, \omega)}{dz^2} + (k_1^2 - \xi_l^2) \varphi_l(z, \omega) = 0 \quad (3)$$

где ξ_l – горизонтальное волновое число.

Граничные условия для (3) требуют равенства нулю давления на поверхности, равенства давлений и нормальных составляющих колебательной скорости на границах жидких слоев и равенства импедансов на границе водный слой – дно.

Для решения дифференциальной спектральной задачи (3) она преобразуется в конечно - разностную путем введения сетки по глубине, строится алгебраическая спектральная задача, находятся собственные числа и собственные вектора алгебраической задачи [5].

Коротко описанный метод реализован в программе "KRAKENC", которая и применялась для вычисления горизонтальных волновых чисел и профилей мод. В случае простейшего волновода Пекериса звуковое поле можно рассчитать по хорошо известным формулам [5]. Фазовые и групповые скорости мод определяются по формулам: $v_l = \omega / \text{Re}(\xi_l)$, $u_l = \Delta\omega / \Delta \text{Re}(\xi_l)$ соответственно.

Для восстановления ИХ вычисляются поля отдельных мод на фиксированных частотах так, чтобы удовлетворялись теоремы о дискретизации.

На частотах ниже критической поле моды полагается равным нулю. Практически, шаг по частоте выбирался $\Delta f = 1$ Гц, число отсчетов $N = 2^{14}$, что дает верхнюю частоту $f_m = N \cdot \Delta f$, частоту дискретизации $f_d = 2f_m$. Соответственно во временной области интервал между отсчетами $\Delta t = 1/f_d$, общее время наблюдения $t_m = N \cdot \Delta t$ [8].

Осуществляя обратное преобразование Фурье (IFFT) полей всех мод по отдельности получаем временные реализации модовых ИХ: $h_i(r, z, t) = \text{IFFT}(p_i(r, z, \omega) \cdot \exp(i\omega(t_0 - \tau)))$, где $t_0 = r/c_1$ – время вступления водной волны, r – расстояние между излучателем и приемником, τ – время опережения начала наблюдения. Затем, суммируя поля мод во временной области, получаем ИХ волновода: $h = \sum_i h_i(r, z, t)$. Временная и частотная структура ИХ подробно рассмотрена в работе [8].

2. Решение для реплики импульса

Представляя волновод как многополюсник с N входами и выходами (в соответствии с шагом дискретизации глубины), следует определить парциальные импульсные характеристики h_{ij} , $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, N$, каждая из которых отображает сигнал на j -м выходе при подаче i -й вход дельта-функции – рис.2. Совокупность функций h_{ij} образует матрицу $\mathbf{h}(t) = (h_{ij}(t))$.

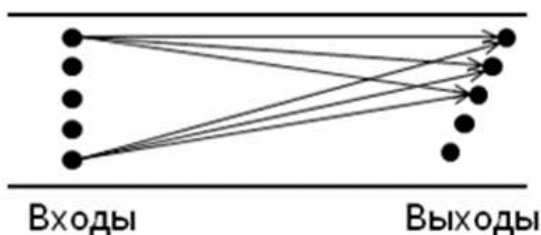


Рис. 2. Волновод как многополюсник

Тогда вектор выходного сигнала $\mathbf{R} = (R_j)$ можно вычислить как $\mathbf{R} = \mathbf{s} \otimes \mathbf{h}$, где $\mathbf{s} = (s_i)$ – вектор-строка входного сигнала, \otimes – символ операции свертки.

3. Результаты моделирования

3.1. Два типа импульсной характеристики волновода шельфа

В условиях мелкого моря из-за различия в групповых скоростях мод и зависимости групповой скорости каждой моды от частоты возникают дисперсионные искажения сигналов. Акустические свойства дна и ПСЗ оказывают сложное и противоположное влияние на закон дисперсии нормальных волн. В случае постоянного ПСЗ первыми в точку приема будут приходить моды с меньшими номерами, групповые скорости которых больше – рис. 3(а). Видна опережающая грунтовая волна, вступление 1-й и затем остальных мод, максимум амплитуды – в начале волнового процесса. В окончании реализации – волна Эйри [8].

Если на ПСЗ есть минимум, формируется звуковой канал, поля низших мод распространяются внутри канала с меньшей групповой скоростью – рис. 3(б). Первыми в точку приема приходят моды с высокими номерами и меньшими амплитудами. Максимум амплитуды – в конце волнового процесса, когда вступает 1-я мода. Такая волновая ИХ более соответствует глубокому морю.

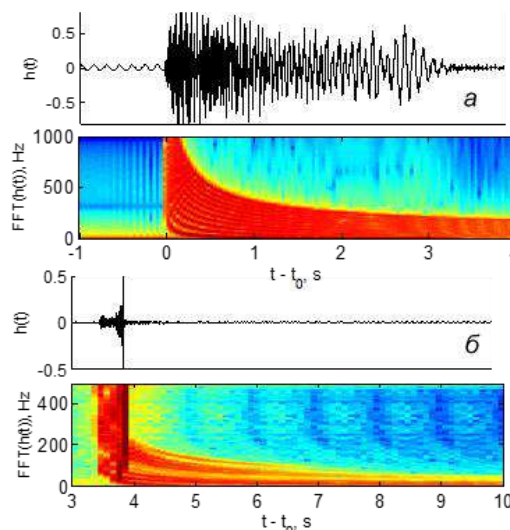


Рис. 3. Импульсные характеристики и спектрограммы; (а) – волновод с постоянным ПСЗ; (б) – волновод, на ПСЗ которого есть минимум – звуковой канал. В случае (а) $z_s = z = h$, $r = 50c_1$, $h = 100$ м; (б) – источник и приемник на оси канала $z_s = z = 50$ м, $h = 100$ м, $r = 50 \max(c_1)$. Отсчет времени – от момента $t_0 = r/\max(c_1)$

Между двумя рассмотренными предельными ситуациями расположен промежуточный случай, когда все моды могут достигнуть точки приема одновременно.

3.2. Изучение возможности определения акустических свойств дна

Одной из важнейших задач акустики мелкого моря является определение акустических и физических свойств морских осадков, составляющих переходный слой толщиной несколько метров. В основном это неконсолидированные осадки, составленные смесью песка с илом, глиной и другими обломочными материалами [7,8].

Возьмем реально измеренные в морских экспериментах SAX99 (точка №1) и TREG13 (точка №2, VLA1) акустические характеристики дна [8]. Восстановим частотные зависимости скорости звука и затухания в рамках теории GSEC [7,8]. Рассмотрим волновод с $c(z) = \text{const}$, глубиной $h = 20$ м (локация SAX99). В точке 1 – чистый среднего размера песок, в точке 2 – слой мусора покрывает более мелкий песок. Такое дно характерно для портов и гаваней.

Проверим возможность различения этих двух типов дна, поставив математический эксперимент.

Вначале, излучая тональный импульсный сигнал и регистрируя реплику, будем увеличивать расстояние между источником и приемником до тех пор, пока отклики волновода с двумя типами дна не станут различимы.

Для точек 1 и 2 критические частоты 1, 2 мод соответственно {51, 155} и {77, 232} Гц. Импульс с частотой $f = 200$ Гц, длительностью 10 периодов и реплики показаны на рис. 4.

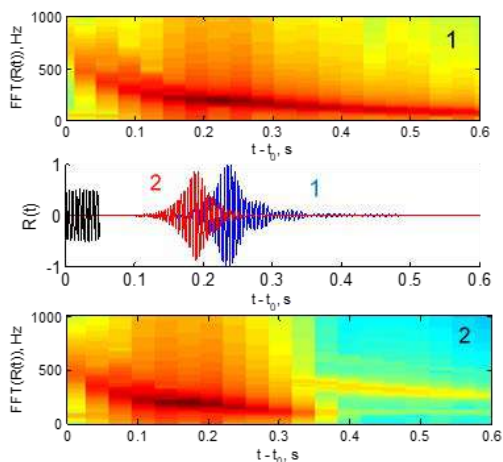


Рис. 4. Реплики и спектрограммы тонального импульса: $z_s=0,5h$, $z=h$, $r=30c_1$, Отсчет времени – от момента $t_0 = r/c_1 = 30$ с

Реплика сигнала пропущена через фильтр низких частот, амплитуда нормирована на реплику волновода с дном 1. Чтобы импульсы разделились и заняли показанное на рис.4 положение по оси времени необходимо расстояние $r = 30c_1 \approx 45$ км! Распространяясь на такое расстояние, поля высших моды уже затухают, остается только 1-я мода. Как видно, различное запаздывание реплик позволяет определить групповую скорость 1-й моды на частоте 200 Гц: дно 1 – $u_1(200 \text{ Гц}) = 30c_1/(t_0 + 0,1903) = 1518,4$ (м/с), дно 2 – $u_1(200 \text{ Гц}) = 30c_1/(t_0 + 0,2378) = 1516$ (м/с), где $t_0 = 30$ с. Отметим, что для дна № 2 (мусор поверх песка) на спектрограмме видны следы 2-й моды, возбужденной переходным процессом при мгновенном включении импульса. Однако, поскольку частота сигнала меньше критической частоты 2-й моды (232 Гц), завершение волнового процесса чистое, без биений. Наоборот, для дна №1 частота сигнала больше критической 2-й моды (155 Гц) и в оконечной части видны биения между репликами сигнала, перенесенными 1-й и 2-й модами.

Следующий сигнал – линейно частотно модулированный (ЛЧМ), так, чтобы согласовать его с законом дисперсии 1-й моды. Сигнал $R = A \sin(2\pi(50 + (300 - 50)/0,4)t)$ с гауссовой огибающей $A(t)$. Частота меняется от 50 Гц до 300 за время 0,4 с. Реакция волновода на этот сигнал показана на рис. 5.

Как видно, лучшим образом такой сигнал оказался согласован с законом дисперсии 1-й моды в волноводе с дном №2. Реплика оказалась сжатой в 8 раз. На спектрограмме видны кратковременные «вспышки», вызванные переходными процессами включения и выключения сигнала.

Сжатие импульса обеспечивается только на определенном расстоянии между излучателем и приемником. Изменение расстояния нарушает условия компрессии и закон изменения фазы сигнала для согласования его с законом дисперсии волновода надо подбирать заново.

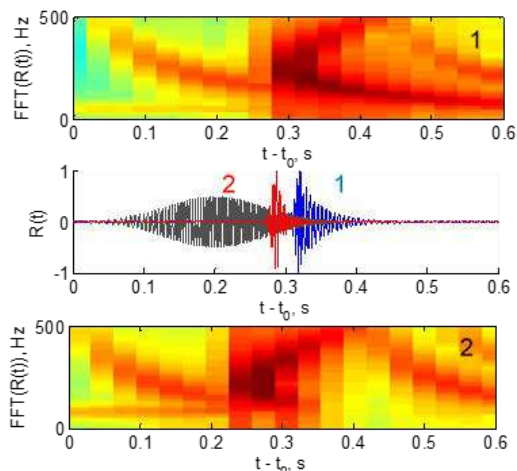


Рис. 5. Реплики и спектрограммы ЛЧМ импульса: $z_s=0,5h$, $z=h$, $r=30c_1$, Отсчет времени – от момента $t_0 = r/c_1 = 30$ с.

Для накопления дисперсионных искажений на коротких дистанциях возможно осуществить рекурсию импульса между двумя трансиверами по схеме многократного приема-переизлучения.

3.3. Дисперсионные искажения импульсов в волноводе со слоем скачка на ПСЗ

При возрастании глубины водного слоя все большее влияние на импульсное поле волны оказывает профиль скорости звука. Трансформация вертикальных профилей нормальных волн с ростом частоты, происходящая вследствие «втягивания» их в область минимума ПСЗ и постепенное изменение закона изменения групповой скорости приводит к возникновению специфичных дисперсионных искажений.

Рассмотрим волновод глубиной $h=60$ м со скачком скорости звука на ПСЗ, от $c(z=0)=1460$ м/с до $c(z=h)=1500$ м/с – приповерхностный звуковой канал.

На рис. 6 показано изменение характера дисперсионных искажений при увеличении частоты и фиксированном расстоянии $r=1500 \cdot 5$ (м). Приемники расположены на двух глубинах: вблизи дна – рис.6, слева, и на глубине $z=10$ м – рис.6, справа. Приведены также спектрограммы импульсной характеристики, из которых видно изменение уровня возбуждения мод в зависимости от частоты. Критические частоты: 13, 23, 38, 54, 60, 66, 75, 94, 113, 123 Гц.

Проанализируем характер переходного процесса включения. Одномодовый импульс с $f=20$ Гц. На этой частоте профиль 1-й моды практически соответствует изоскоростному водному слою, возбуждение 1-й моды вблизи дна несколько выше, чем на глубине 20 м, и амплитуда импульса примерно в 2 раза больше.

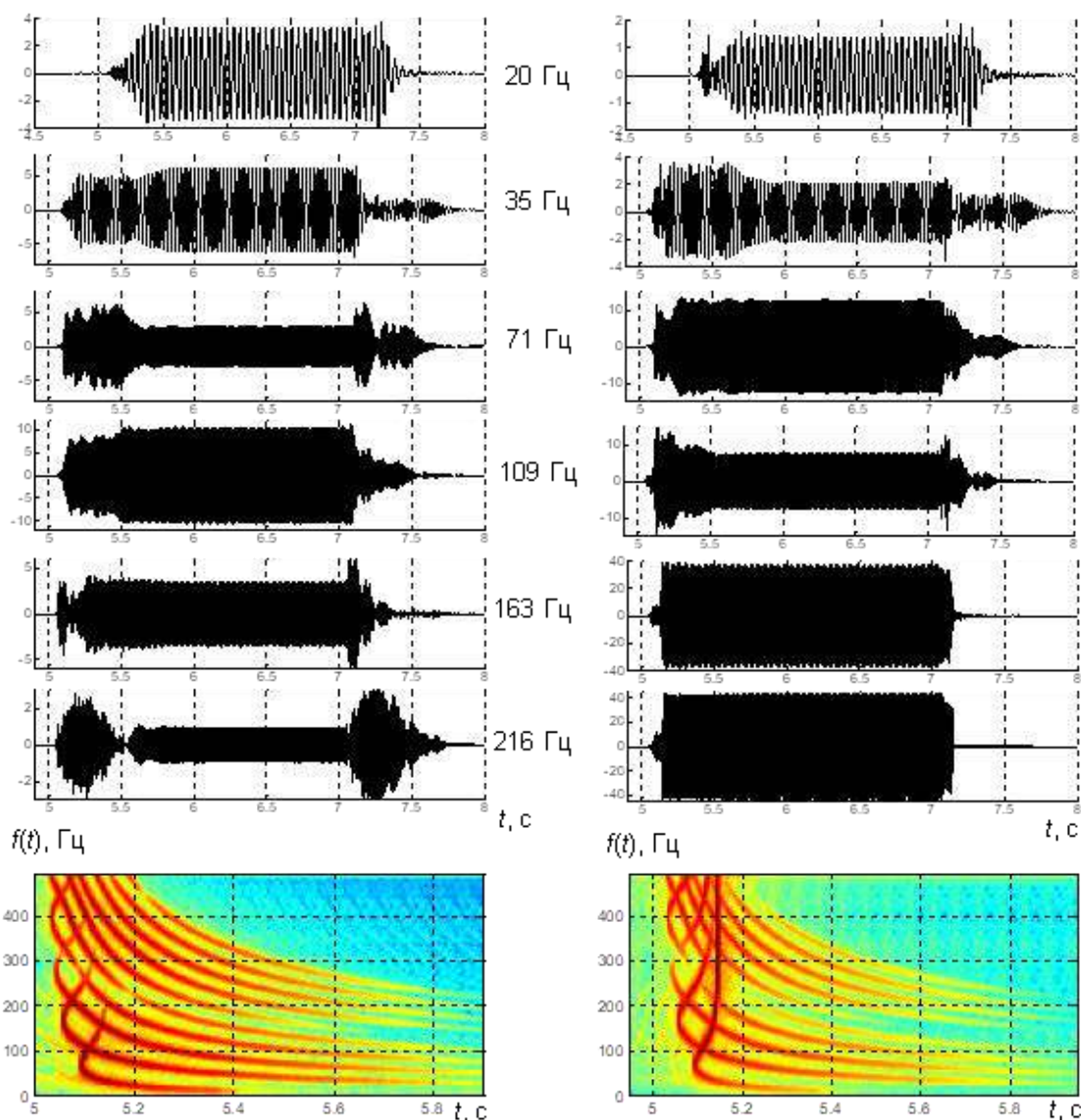


Рис. 6. Изменение характера дисперсионных искажений в зависимости от частоты. Волновод с приповерхностным звуковым каналом. Слева – приемник вблизи дна, справа – на глубине 10 м. Отсчет времени – от момента $t_0 = 5$ с.

Двухмодовый импульс с $f=35$ Гц. По спектрограмме момент вступления 2-й моды ≈ 5.6 с, здесь амплитуда волнового процесса меняется. Поскольку фазы колебаний 1-й и 2-й моды на двух глубинах различны, вблизи дна амплитуда возрастает, ближе к поверхности – уменьшается.

Частота $f=71$ Гц соответствует максимуму групповой скорости 1-й моды. Вблизи дна, после резкого вступления, возникают биения с колебаниями затухающей 2-й моды, возбужденной переходным процессом вступления. Колебания 3-й моды оказываются противофазны, и после ее вступления (≈ 5.5 с) амплитуда процесса уменьшается. Ближе к поверхности уровень возбуждения 1-й моды значительно выше, биения выражены слабо, колебания 1-й – 3-й мод синфазны.

Частота $f=109$ Гц соответствует равенству групповых скоростей 1-й и 2-й мод. Видна картина биений, амплитуда и частота которых изменяются при вступлении импульсов 3-й и 4-й мод. Частота 163 Гц соответствует максимуму групповой скорости 2-й

моды и равенству скоростей 1-й и 3-й мод. Вблизи дна вступление 2-й моды выделяется резким отделяющимся всплеском амплитуды. На этой частоте, вследствие «втягивания» профиля в область минимума ПСЗ, уровень возбуждения 1-й моды начинает ощутимо снижаться вблизи дна и возрастать «ближе к поверхности», поэтому с ростом частоты поле «ближе к поверхности» будет в основном определяться полем 1-й моды, а вблизи дна – полями высших мод. Частота $f=216$ Гц соответствует равенству скоростей 2-й и 3-й мод, 1-й и 4-й мод, а также слабому возбуждению 5-й моды. У дна, начальная часть импульса представляет сложный волновой процесс, а транзит основной частоты осуществляется 5-й и 6-й модами. У поверхности амплитуда основной частоты формируется полем 1-й моды и оказывается во много раз больше.

На рис. 7 показано изменение дисперсионных искажений в зависимости от глубины приемника. Частота импульса 250 Гц.

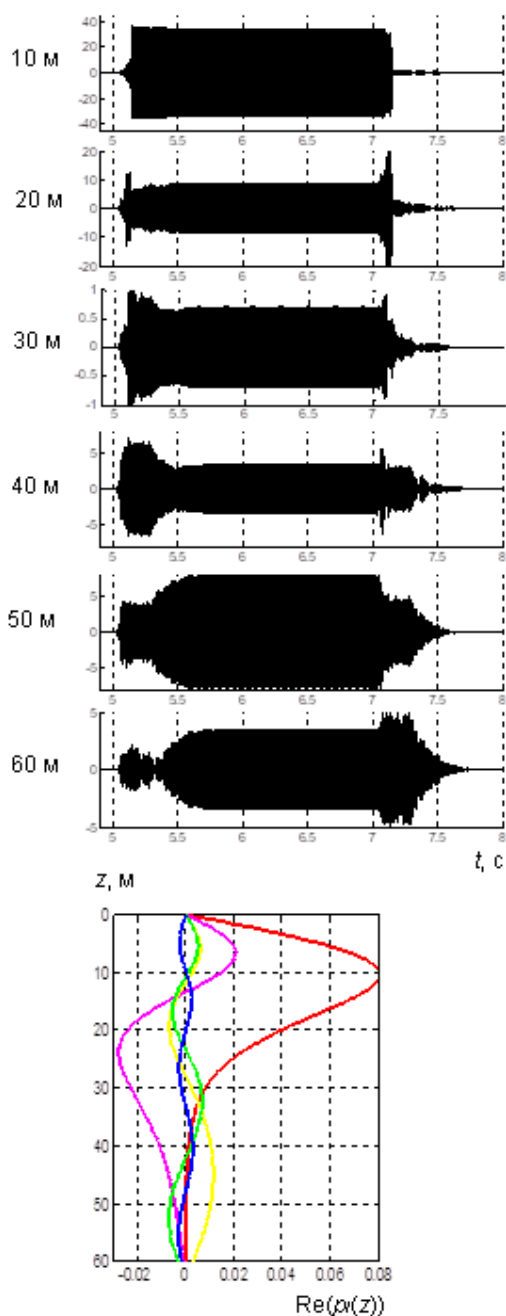


Рис. 7. Изменение характера дисперсионных искажений в зависимости от глубины приемника. Нижняя панель – вещественные части профилей мод, с 1-й по 5-ю. Отсчет времени – от момента $t_0 = 5$ с

Характер изменения переходных процессов связан с перераспределением уровня возбуждения мод по глубине. Глубина 10 м. Здесь максимально возбуждение 1-й моды, за счет чего и формируется почти мгновенный фронт вступления основной частоты. Перед фронтом видна опережающая часть, сформированная 2-й – 4-й модами (по спектрограмме на рис. 6, справа). Глубина 20 м. Вступление 3-й, затем 2-й и 4-й мод формируют опережающий ступенчатый «выступ-всплеск». Приход противофазных колебаний 1-й моды приводит к уменьшению результирующей амплитуды процесса. С ростом глубины амплитуда установившейся части

импульса снижается, а переходный процесс усложняется. Импульсы на глубинах 40 м – 60 м сформированы 8-й – 10-й модами.

На рис. 8 – накопление дисперсионных искажений с увеличением расстояния. Глубина приемника 20 м, импульс с частотой 150 Гц, длительность 0,1 с, амплитуда – условные единицы. Момент вступления импульса в среде без дисперсии $t=r/1500$.

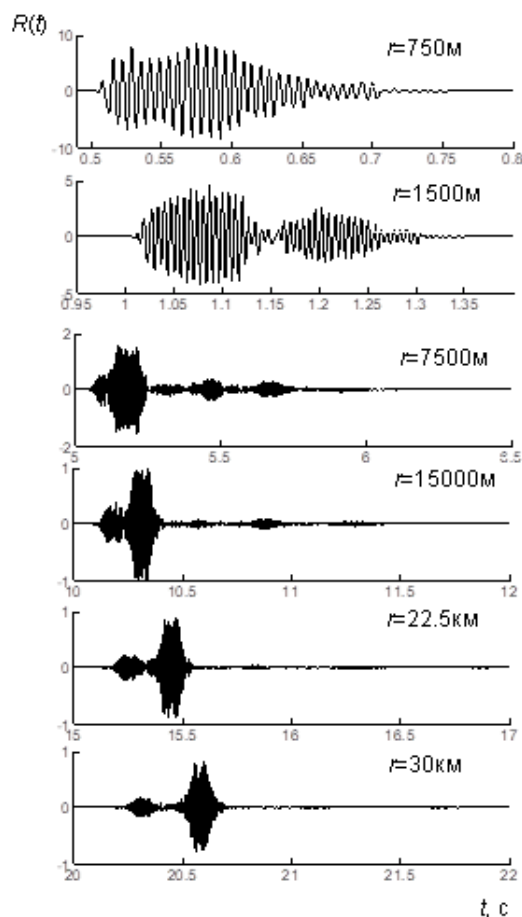


Рис. 8. Изменение характера дисперсионных искажений в зависимости от расстояния

По мере увеличения расстояния становятся различимыми вступления импульса по отдельным модам в таком порядке: 2-я мода, группа 1-я и 3-я моды, 4-я, 5-я моды и т.д. При увеличении расстояния свыше 22,5 км высшие моды «высвечиваются» из канала, и остаются только 1-я и 2-я «захваченные», с самыми малыми коэффициентами поглощения.

3.4. Дисперсионные искажения импульсов в волноводе шельфа с ПЗК

Рассмотрим распространение сигналов в волноводе с профилем скорости звука, соответствующим Черноморскому шельфовому ПЗК термического типа. Ось ПЗК расположена на глубине 50 м. Особенность такого ПЗК – вследствие медленного «гидростатического» роста $c(z)$ с глубиной, неизбежно взаимодействию звука с дном, приводящее к повышенному его ослаблению с расстоянием по сравнению с глубоководным

океаническим ПЗК. Критические частоты мод с 1-й по 10-ю: 4, 7, 11, 14, 18, 21, 23, 26, 29, 32 Гц.

На рис. 9 – накопление дисперсионных искажений при увеличении дистанции между излучателем и приемником.

Расстояния соответствуют кинематическим моментам вступления волны, распространяющейся в бездисперсионной среде с максимальной на ПЗС скоростью (1510 м/с): 5с, 10с, 50с, 100с. Приведенная спектрограмма соответствует последней реализации. Импульс – 10 периодов частоты 250 Гц.

На небольших расстояниях (5с, 10с) порядок вступления мод следующий: группа 5-я, 6-я, 7-я, 3-я, 8-я, 2-я, 1-я основная, высшие. По мере увеличения расстояния, моды, вступающие позднее 1-й, «высвечиваются», а вступающие ранее, начинают разделяться. Однако, большое количество мод, опережающих 1-ю, и переходные процессы приводят к формированию практически непрерывного затянутого сигнала. При дальнейшем увеличении расстояния отделяются импульсы опережающей 5-й, затем 4-й, 6-й мод, с примерно равными групповыми скоростями и импульс 2-й моды, непосредственно предшествующий импульсу 1-й основной моды. Импульс 2-й моды имеет выраженную «колоколообразную» форму, а длительность импульса 1-й моды значительно сокращается, поскольку он формируется из множества частот, приходящих в точку приема практически одновременно.

Заключение

Представлен оригинальный численно-аналитический метод восстановления откликов волновода на сигналы с неограниченной длительностью и с произвольными видами модуляции, основанный на принципе свертке сигнала с импульсной характеристикой. Оригинальность метода заключается в том, что импульсная характеристика волновода формируется во временной области путем сложения импульсных характеристик отдельных мод. Модовые импульсные характеристики восстанавливаются с помощью обратного дискретного преобразования Фурье акустического поля отдельной нормальной волны.

Показано, что определение дисперсионных свойств нормальных волн может быть осуществлено излучением импульсов с нелинейными законами

модуляции фазы, при этом наибольшее сжатие импульса-отклика будет свидетельствовать о том, что закон изменения фазы «согласован» с законом дисперсии данной моды.

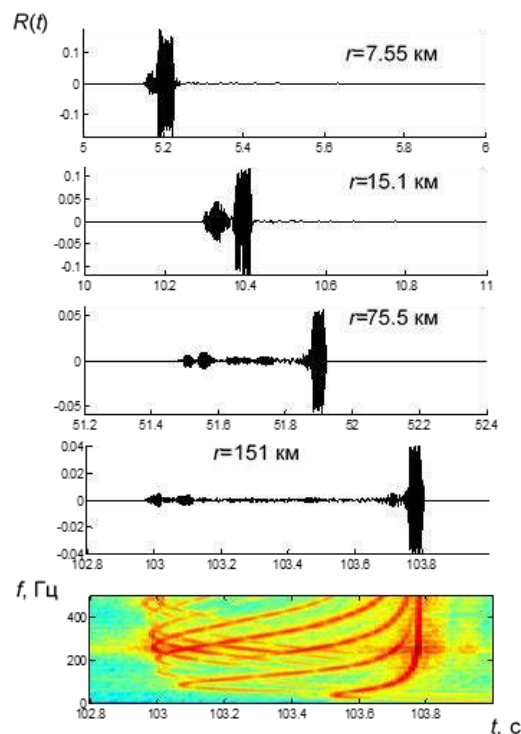


Рис. 9. Изменение характера дисперсионных искажений в зависимости от расстояния. Черноморский волновод шельфа с ПЗК

Показана качественная связь между характером дисперсионных искажений коротких импульсных сигналов и акустическими характеристиками неконсолидированных морских осадков.

Установлен характер изменения дисперсионных искажений импульсных сигналов в волноводах с изоскоростным и рефракционным водным слоем при изменении частоты сигнала, изменении глубины приемника и расстояния между источником и приемником.

Литература

1. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2012.
2. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Оценка акустических параметров модели дна в мелком море с использованием априорной геолого-геофизической информации и преобразования Вигнера. Акустический журнал. 2014. Т. 60, № 2. С. 190–195. doi:10.7868/S0320791914010055
3. Рутенко А.Н., Гриценко В.А., Ковзель Д.Г., Манульчев Д.С., Фершалов М.Ю. Методика оценки параметров измеренных на Сахалинском шельфе акустических импульсов для многофакторного анализа их влияния на серых китов. Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 662–674.
4. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря. Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
5. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. Springer Science+Business Media, LLC 2011. 794 p.
6. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Ярошенко А.А. Сравнительная оценка вклада лучевых и волновых компонент при распространении импульсных сигналов в подводном звуковом канале Черного моря. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2018. Т. 15. № 2. С. 74–85.

7. Лисютин В.А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью. Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 85 – 100.
8. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р. Оценка влияния внутреннего и вязкого трения на дисперсию и затухание звука в неконсолидированных морских осадках. Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 4. С. 420–436.
9. Лисютин В.А., Ластовенко О.Р., Довгаленко В.В., Лучин В.Л., Петренко Н.В. Метод симуляции импульсной характеристики гидроакустического волновода с жидким дном. Инженерный вестник Дона, 2020, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6281.7.
10. Афонин И.Л., Боран-Кешишьян А.Л., Боков Г.В. Пластинчатый металлодиэлектрический волновод. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 225-226.

References

1. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2012.
2. Belov A.I., Kuznetsov G.N. Estimating the acoustic parameters of a model of a shallow-water seafloor using a priori geological and geophysical information and the Wigner transform. Acoustical Physics, 2014, Vol. 60, No. 2, pp. 191–196.
3. Rutenko A. N., Gritsenko V. A., Kovzel D. G., Manulchev D. S., and etc. A Method for Estimating the Characteristics of Acoustic Pulses Recorded on the Sakhalin Shelf for Multivariate Analysis of their Effect on the Behavior of Gray Whales. Acoustical Physics, 2019, Vol. 65, No. 5, pp. 556–566.
4. Morgunov Yu. N., Golov A. A., Burenin A. V., Petrov P. S. Studies of Spatiotemporal Structure of the Acoustic Field Formed in Deep Water by a Broadband Pulsed Signal Source on the Shelf of the Sea of Japan. Acoustical Physics, 2019, Vol. 65, No. 5, pp. 537–544.
5. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. Springer Science+Business Media, LLC 2011. 794 p.
6. Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Yaroshenko A.A. Sravnitel'naya otsenka vklada luchevykh i volnovykh komponent pri rasprostraneniі impul'snykh signalov v podvodnom zvukovom kanale Chernogo morya [A comparative assessment of the contribution of beam and wave components during the propagation of pulsed signals in the underwater sound channel of the Black Sea] 2018. Vol. 15. No. 2. P. 74-85.
7. Lisyutin V.A. Generalized Rheological Model of the Unconsolidated Marine Sediments with Internal Friction and Effective Compressibility. Physical Oceanography, [e-journal] 26(1), pp. 77-91. doi:10.22449/1573-160X-2019-1-77-91
8. Lisyutin V.A., Lastovenko O.R. Assessing The Influence of Internal and Viscous Friction on Dispersion and Sound Attenuation in Unconsolidated Marine Sediments. Acoustical Physics, 2020, Vol. 66, No. 4, pp. 401–415.
9. Lisyutin V.A., Lastovenko O.R., Dovgalenko V.V., Luchin V.L., Petrenko N.V. Metod simulyatsii impul'snoy kharakteristiki gidroakusticheskogo volnovoda s zhidkim dnom [Method for simulating the impulse response of a hydroacoustic waveguide with a liquid bottom]. Inzhenernyy vestnik Dona, 2020, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6281.7.
10. Afonin I.L., Boran-Keshish'yan A.L., Bokov G.V. Platinchatyy metallodielektricheskiy volnovod. [Plate metal-dielectric waveguide]. SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii. 2020. № 1-2. S. 225-226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анастас Леонидович Бран-Кешишьян, кандидат технических, доцент, проректор по конвенционной подготовке и филиалам, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: Aumsu.stcw@gmail.com

Виктор Александрович Лисютин, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: vlisiutun@mail.ru

Жанна Владимировна Маленко, старший преподаватель кафедры фундаментальных дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, e-mail: zhvla17@mail.ru

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph. D. (Eng), Associate Professor, Vice-Rector for Convention Training and Branches, Admiral F. F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, e-mail: Aumsu.stcw@gmail.com

Viktor A. Lisyutin, Ph. D. (Phys & Math), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, e-mail: vlisiutun@mail.ru

Zhanna. V. Malenko, Senior Lecturer of the Department of Fundamental Disciplines, Branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University» in Sevastopol, 299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: zhvla17@mail.ru

Александр Александрович Ярошенко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальных дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, профессор кафедры «Высшая математика», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Alexander A. Yaroshenko, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Head of the Department of Fundamental Disciplines, Branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University» in Sevastopol , 299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation, professor of the Department of Higher Mathematics, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, e-mail: yaroshenko.575@yandex.r

Поступила в редакцию: 14.07 2021

Принята к публикации: 15.09.2021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.68:15:681.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.014>**Моделирование схемы безопасного движения морской акватории****В.М. Гриняк**^{1,2,3} e-mail: victor.grinyak@gmail.com, **А.С. Девятисильный**¹ e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru, **А.В. Шуленина**² e-mail: shuleninaav@mail.ru¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ²Дальневосточный федеральный университет, ³Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Аннотация. Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. В условиях насыщенного трафика навигационная безопасность может быть обеспечена только при соблюдении судами определённой схемы движения. В работе ставится задача планирования системы маршрутов (схемы движения) судов через акватории с интенсивным трафиком. Эта схема зависит от географии акватории и особенностей трафика. Выбор того или иного варианта схемы обусловлен необходимостью обеспечения максимальной безопасности движения и практическими соображениями. В основу метода решения задачи положено моделирование движения судов по множеству возможных траекторий и оценка метрики, описывающей степень опасности движения. В качестве такой метрики предлагается частота опасных сближений судов, отмечается возможность использования и других метрик. В работе показано, что модельное представление задачи на основе взвешенного графа не даёт возможности её решения без привлечения специализированных вычислительных ресурсов. Альтернативным подходом является конструирование схем движения экспертным способом из типичных структурных элементов (примитивов). Имитационное моделирование задачи изолированно в рамках отдельного примитива вполне возможно на доступных вычислительных и программных платформах общего назначения. В работе рассмотрено четыре таких примитива, оценено среднее время между опасными сближениями судов для каждого из них. Приведён пример использования полученных результатов моделирования для планирования безопасных схем движения судов.

Ключевые слова: безопасность судоходства, управление движением судов, система установления путей движения, интенсивное движение, опасное сближение, моделирование судопотока, алгоритмы на графах.

Modelling of safe traffic schema for marine area**Victor M. Grinyak**^{1,2,3} e-mail: victor.grinyak@gmail.com, **Alexander S. Devyatisilyi**¹ e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru, **Alena V. Shulenina**² e-mail: shuleninaav@mail.ru¹Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, ²Far Eastern Federal University, ³Vladivostok State University of Economics and Service

Abstract. This work is devoted to the problem of ensuring the safety of vessel traffic at marine areas. Navigation safety in conditions of heavy traffic can be ensured only if the vessels comply with a certain traffic pattern. The paper highlights the problem of planning a system of routes (traffic patterns) of vessels through water areas with heavy traffic. This schema depends on the geography of the water area and the characteristics of traffic. The necessity to ensure the maximum safety of vessel traffic and practical considerations determine the choice of a specific variant for a traffic scheme. Modeling the vessels motion along a set of possible trajectories and evaluating the metric describing the degree of movement danger is the basis of the method for solving the problem. The frequency of dangerous approaches of vessels is proposed as a metric for assessing the danger of traffic, and the possibility of using other metrics is noted. The work demonstrates that the model representation of the problem based on a weighted graph does not allow its solution without the involvement of specialized computing resources. An alternative approach is motion construction of schemes in an expert way from typical structural elements (primitives). Simulation modeling of a problem becomes possible on available general-purpose computing and software platforms if it is isolated within a separate primitive. The paper considers four such primitives and estimates the average time between dangerous approaches of vessels for each of them. An example of using the obtained modeling results for planning safe ship traffic patterns is given.

Key words: maritime safety, marine traffic control, traffic pattern, traffic intensity, collision risk assessment, ships flow simulation modeling, graph algorithms.

Введение

Традиционным подходом к обеспечению навигационной безопасности движения судов является решение трёх задач: оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения и планирования траектории безопасного движения судов [1]. На акваториях с интенсивным трафиком эти классические задачи не всегда способны обеспечить необходимый уровень безопасности, в связи с чем необходима дополнительная координация совместных действий участников движения [2]. В том числе – в форме следования определенной на акватории схеме безопасного

движения (правил движения). В судоводительской практике в отношении такой схемы устоялся термин «система установления путей движения судов» [3].

Исторически формирование схемы движения конкретной акватории происходило исходя из возможности её реализации с учетом географии района и судоводительской практики. Важным было наличие удобных визуальных ориентиров, позволяющих судоводителю следовать установленным маршрутом [4]. При необходимости естественные ориентиры (приметные горы, мысы, острова и т.п.) дополнялись искусственными (маяки, светящиеся знаки, буи и т.п.). Соотнесенный с правилами судовождения такой подход приводил к

формированию схемы движения не столько безопасной, сколько удобной для повседневной работы судоводителей и диспетчеров береговых служб в условиях ограниченных возможностей навигационных средств прошлых лет (до наступления цифровой эпохи).

Рост интенсивности судоходства в последние годы нередко выявлял ограничения «старых» схем с точки зрения их пропускной способности и безопасности [5]. Одновременно с этим развитие концепции Е-навигации и приход нового поколения навигационных средств (спутниковые системы позиционирования, системы автоматизированной прокладки, Автоматическая идентификационная система) позволили реализовать любые допустимые географией акватории маршруты судов, не ограничиваясь возможностями визуального наблюдения [6, 7]. Это определило необходимость и перспективность разработки новых подходов к планированию схем движения судов на морских акваториях.

Настоящая работа посвящена исследованию задачи планирования схемы движения судов, обеспечивающей безопасность в условиях высокой интенсивности трафика. В основу метода решения задачи положено имитационное моделирование движения по множеству возможных траекторий и оценка метрики, описывающей степень опасности движения. Выбор в пользу того или иного варианта схемы движения из возможных обусловлен необходимостью обеспечения максимальной безопасности коллективного движения и практическими соображениями. Актуальность исследования обусловлена в том числе перспективами развития безэкипажного судоходства [8].

Материалы и методы

Пусть имеется некоторая акватория, на которой выделены разрешенные и запрещенные для движения судов районы. Имея в виду небольшие размеры типичных акваторий (обычно не более 100 км, можно пренебречь шарообразностью Земли), для их моделирования будем использовать прямоугольную декартову систему координат.

Примем, что на границах и внутри акватории имеются зоны входа судов на акваторию IN_m ($m = \overline{1, M}$) и зоны выхода судов с акватории OUT_n ($n = \overline{1, N}$). Зоны могут быть как непересекающимися, так и пересекаться. Будем считать известной интенсивность судопотока A_{mn} из зоны IN_m в зону OUT_n , выражаемую, например, количеством выходящих судов в единицу времени при заданных характерных скоростях, геометрических размерах и траекторных свойствах судов. Такое представление позволяет моделировать потоки судов, проходящих через акваторию [9].

Пусть заданы маршруты судов из зон входа в зоны выхода. Будем осуществлять моделирование трафика акватории в дискретные моменты времени t_i . Модель движения конкретного судна опишем кинематическими уравнениями

$$x_{i+1} = x_i + v_i \sin K_i (t_{i+1} - t_i),$$

$$y_{i+1} = y_i + v_i \cos K_i (t_{i+1} - t_i).$$

Здесь x_i, y_i – декартовы координаты судна в момент времени t_i , v_i и K_i – соответственно скорость и курс судна. Примем, что модель скорости и курса судна включают в себя случайную компоненту, так что $v_{i+1} = v_i + \delta v_i$ (где δv_i – случайная величина с известным распределением), а курс судна K_i выбирается на каждом шаге так, чтобы обеспечивать движение по заданному маршруту, так что $K_i = K_i^* + \delta K_i$ (где K_i^* – определяемое траекторией значение курса судна, δK_i – случайная величина с известным распределением).

Будем генерировать суда в зонах IN_m согласно заданной интенсивности судопотока A_{mn} и моделировать движение судов к зонам OUT_n , по мере их достижения удаляя суда из обработки. Тем самым получим имитационную модель движения судов на акватории.

В качестве метрики, характеризующей степень опасности движения, выберем количество опасных сближений судов в единицу времени [5]. Будем считать взаимное расположение судов опасным, если расстояние между ними меньше некоторого критического расстояния R^* , зависящего от геометрических размеров судов. Реализуя имитационную модель движения судов, можно вести подсчет опасных сближений судов как на всей акватории, так и на её отдельных участках, выявляя тем самым наиболее проблемные.

Таким образом, ставится задача выбора множества маршрутов судов из зон входа IN_m в зоны выхода OUT_n таким образом, чтобы они обеспечивали минимум количества опасных сближений судов в рамках описанной имитационной модели. Решение этой задачи позволит спланировать схему безопасного движения на выбранной акватории.

Рассмотрим модель поставленной задачи на графе. Пусть на акватории определено множество ребер и множество вершин. Множество вершин графа формируется в виде равномерной квадратной сетки с заданным расстоянием между вершинами. Множество ребер задается так, чтобы каждая вершина была соединена отрезком с каждой. Чтобы число ребер не было чрезмерным, их возможная длина ограничивается. Учитывается география акватории: нет вершин в запрещенных для плавания районах, ребра не должны пересекать такие районы.

Вершины, расположенные в зонах IN_m и OUT_n являются начальными и конечными точками возможных маршрутов судов. Пусть P_{mn} – множество возможных путей на графе, приводящих из зоны IN_m в зону OUT_n . Для уменьшения числа возможных путей целесообразно ввести ряд ограничений: на длину пути, на величину изменения курса судна в вершине, запретить циклические пути и т.п. Моделируя движение по возможным путям

получим количество опасных сближений судов для каждой пары путей. Решение исходной задачи планирования схемы движения дают те пути, которые обеспечивают минимум опасных сближений.

Выбор путей из множеств P_{mn} приводит (в случае реальных акваторий) к необходимости имитационного моделирования задачи для очень большого числа судов. Ещё одной проблемой, возникающей при решении описанной задачи, является случайный характер оценки количества опасных сближений для пар выбранных путей. Это не даёт возможность устойчиво различить похожие пути с точки зрения меры их безопасности: разные реализации модели дают существенно различающиеся оценки маршрутов схемы движения судов. Уменьшить случайную составляющую в оценке количества опасных сближений возможно, если на несколько порядков увеличить число моделируемых судов, однако это потребует использования специализированных вычислительных ресурсов. Другими словами, особенности описанной задачи затрудняют её

прямое решение для акватории в целом традиционными методами и средствами.

Альтернативным подходом является конструирование возможных схем движения экспертным способом из структурных элементов (примитивов), представляющих собой принятые в практике судовождения типичные конфигурации траекторий. Реализация описанной имитационной модели изолированно в рамках отдельного примитива вполне возможна на доступных вычислительных и программных платформах общего назначения.

Рассмотрим следующие примитивы траекторий судов:

- пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1а);
- пересечение двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1б);
- пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности (рис. 1в);
- пересечение двусторонних судопотоков с зоной кругового движения (рис. 1г).

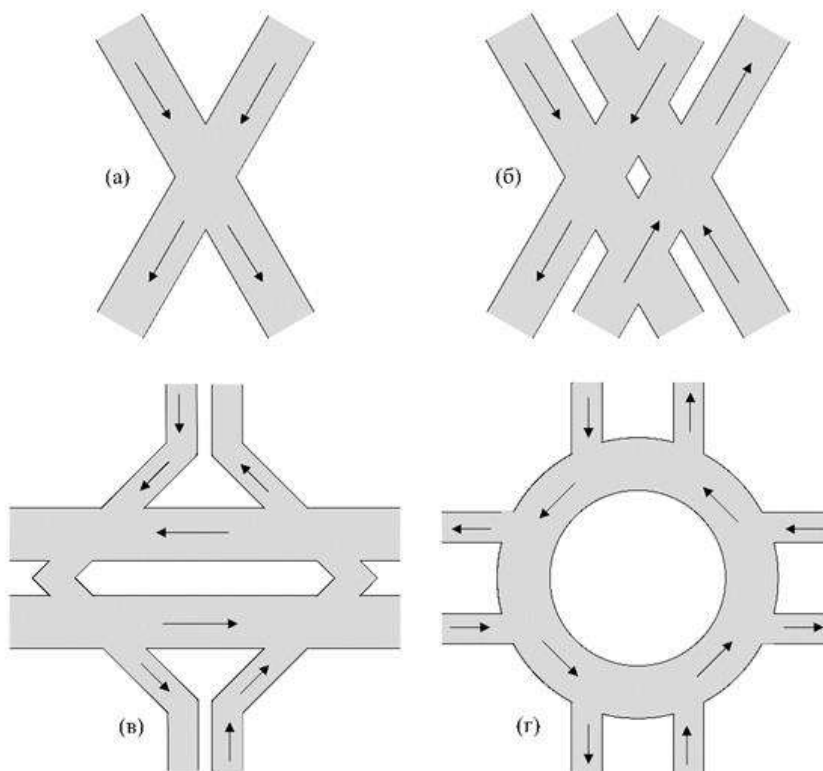


Рис. 1. Модели примитивов траекторий судов

В первом случае (рис. 1а) считается, что односторонние судопотоки равной интенсивности пересекаются под некоторым углом (интенсивность потока выражается в количестве судов, проходящих за единицу времени при заданной скорости). Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения судопотоков, их интенсивности и размеров судов (значений параметра R^*).

Во втором случае (рис. 1б) считается, что двусторонние судопотоки равной интенсивности пересекаются под некоторым углом. Эта ситуация соответствует «суммированию» четырёх примитивов, показанных на рисунке 1а. Здесь тоже

нужно оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения потоков, их интенсивности и размеров судов.

Во третьем случае (рис. 1в) считается, что двусторонний судопоток большой интенсивности пересекается двусторонним судопотоком меньшей интенсивности. Суда, движущиеся в «большом» потоке, сохраняют прямолинейное движение, а суда, движущиеся в «малом» потоке, изменяют курс для пересечения «большого» потока под возможно меньшим углом. Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от угла пересечения потоков, размеров судов, интенсивности потоков судов и их скоростей.

В четвертом случае (рис. 1г) считается, что пересекаются двусторонние судопотоки с одинаковой интенсивностью движения и для уменьшения числа опасных сближений организовано круговое движение. Требуется оценить характерное количество опасных сближений в зависимости от размеров судов и интенсивности их потоков.

Результаты

Рассмотрим пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности (рис. 1а). На рис. 2 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов: по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах). При этом были приняты следующие значения параметров (см. табл. 1): R^* равно 300, 600 и 900 метров, временные интервалы между соседними судами, движущимися в потоке, являются случайными значениями и равномерно распределены в отрезке [1,10] и [1,20] минут, скорость судов была равна 10 м/с. Здесь и в следующих примерах моделирование движения судов проводилось на интервале 100 дней.

Из рис. 2 видно, что имеет место близкая к обратной линейной зависимости средних интервалов между опасными сближениями τ от критического расстояния между судами R^* (это хорошо видно, например, при сопоставлении графиков 1 и 2, 4 и 5).

Таблица 1

Параметры судопотоков (односторонних одинаковой интенсивности)

Номер графика	Расстояние между судами R^* , метров	Интервал времени между судами, минут
1	300	[1,20]
2	600	[1,20]
3	900	[1,20]
4	300	[1,10]
5	600	[1,10]
6	900	[1,10]

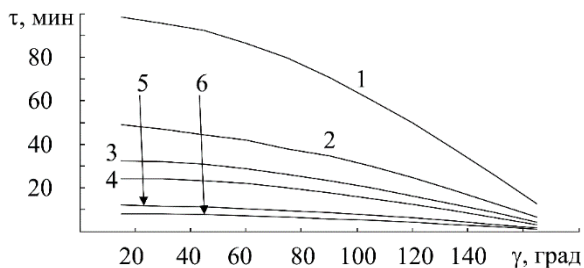


Рис. 2. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности

Близкая к квадратичной зависимость наблюдается между длиной интервала времени между соседними

судами и τ . Последнее легко предположить априорно, так как при уменьшении интервала времени между судами обратно пропорционально увеличивается число судов в каждом судопотоке. Видно также, что при пересечении судопотоков под острым углом величина τ в несколько раз выше, чем при пересечении под «очень тупыми» углами (больших, чем 135°); разница в величине τ для «очень острых» углов (меньших, чем 45°) невелика (около 10%). Таким образом, при планировании схемы движения следует стремиться к пересечению односторонних судопотоков только под острыми углами, однако уменьшение углов ниже 45° уже не даёт существенного эффекта.

Пересечение двусторонних судопотоков (рис. 1б) сводится к комплексированию четырёх примитивов односторонних судопотоков. На рис. 3 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов для случая двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности и параметров движения, представленных в табл. 1; как и в предыдущем примере по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах).

Из рис. 3 видно, что, как и можно предположить, значения τ симметричны относительно угла $\gamma = 90^\circ$; при таких значениях γ значения τ в четыре раза меньше, чем на соответствующих графиках рис. 2. Так как в точке $\gamma = 90^\circ$ достигается максимум значений τ , при планировании схемы движения следует стремиться к пересечению двусторонних судопотоков под прямым углом.

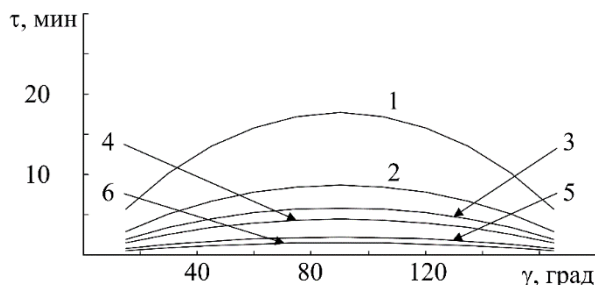


Рис. 3. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности

Рассмотрим пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности (рис. 1в). На рис. 4 показаны результаты оценки среднего количества опасных сближений судов, были приняты следующие значения параметров (см. табл. 2). Как и в двух примерах ранее по оси абсцисс отложен угол пересечения судопотоков γ (в градусах), по оси ординат – средний период между опасными сближениями τ (в минутах).

Таблица 2

Параметры судопотоков (двусторонних разной интенсивности)

Номер графика	Расстояние между судами R^* , метров	Интервал времени между судами, большой поток, минут	Интервал времени между судами малый поток, минут	Скорость судов, большой поток, м/с	Скорость судов, малый поток, м/с
1	300	[1,10]	[1,40]	10	10
2	300	[1,10]	[1,40]	20	10
3	300	[1,10]	[1,20]	10	10
4	300	[1,10]	[1,20]	20	10
5	600	[1,10]	[1,40]	10	10
6	600	[1,10]	[1,40]	20	10
7	900	[1,10]	[1,40]	10	10
8	900	[1,10]	[1,40]	20	10
9	600	[1,10]	[1,20]	10	10
10	600	[1,10]	[1,20]	20	10
11	900	[1,10]	[1,20]	10	10
12	900	[1,10]	[1,20]	20	10

Были приняты следующие значения параметров (см. табл. 2): R^* равно 300, 600 и 900 метров, временные интервалы между соседними судами, движущимися в «большом» потоке, равномерно распределены в отрезке [1,10] минут, в «малом» потоке – в отрезках [1,20] и [1,40] минут. Скорость судов в «большом» потоке была равна 10 м/с (сплошные линии) и 20 м/с (пунктир), скорость судов в малом потоке была равна 10 м/с.

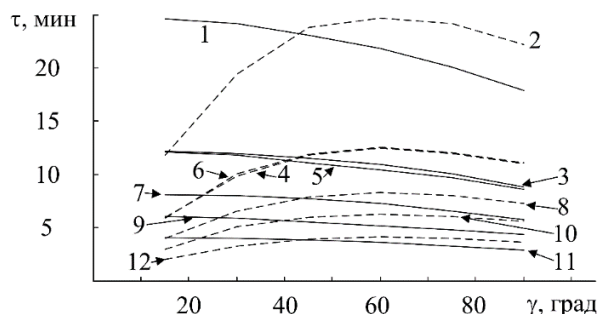


Рис. 4. Средний интервал между опасными сближениями: пересечение двусторонних судопотоков разной интенсивности

Из рис. 4 видно, что имеется близкая к обратной линейной зависимость средних интервалов между опасными сближениями τ от критического расстояния между судами R^* . Близкая к линейной зависимость наблюдается также между τ и интервалом времени между соседними судами в «малом» потоке. Это создаёт, например, эффект очень близких (почти совпадающих) графиков 3 и 5, 4 и 6. В том случае, если скорости судов в пересекающихся потоках не равны, величина τ на при острых углах их пересечения резко уменьшается (пунктирные графики). Это объясняется тем, что суда «быстрого» потока догоняют суда «медленного» потока. В случае равных по скорости судопотоков наибольшие значения τ обеспечиваются при углах их пересечения меньше 45° , разница между ними в этом случае незначительна (не превышает 10%). Таким образом, наиболее удобным для практики является

пересечение судопотоков под углом в 45° при близких скоростях движения судов.

Таблица 3

Параметры судопотоков (двусторонних с зоной кругового движения) и среднее количество опасных сближений судов

	Расстояние между судами R^* , метров	Интервал времени между судами, минут	Средний период между опасными сближениями τ , минут
1	300	[1,20]	24.6
2	600	[1,20]	12.3
3	900	[1,20]	8.2
4	300	[1,10]	6.0
5	600	[1,10]	3.0
6	900	[1,10]	2.0

Рассмотрим пересечение двусторонних судопотоков с зоной кругового движения (рис. 1г). Таблица 3 показывает результат оценки среднего периода между опасными сближениями судов. При моделировании для простоты считалось, что судопотоки имеют одинаковую интенсивность движения и движутся только в направлениях «верх-низ», «низ-верх», «право-лево», «лево-право», что определяет интенсивность движения «на круге». Все судопотоки были равной ширины, внутренний радиус «круга» был принят равным двум расстояниям между противоположными «прямыми» судопотоками.

Из таблицы 3 видно, что и в случае кругового движения имеется близкая к обратной линейной зависимость между R^* и τ ; также как и в примерах ранее наблюдается близкая к квадратичной зависимость между τ и длиной интервала времени между соседними судами. Данные таблицы 3 обосновывают преимущество круговой схемы при пересечении двусторонних судопотоков с интенсивным движением. Так, при $R^* = 300$ м. и случайном интервале времени между судами в отрезке [1,20] (строка 1) значения τ для кругового движения (24.6 минут) примерно на треть выше, чем при пересечении двусторонних судопотоков под прямым углом (около 18 минут, максимум графика 1,

рис. 3). Похожее соотношение можно увидеть и для судопотоков с другими параметрами.

Обсуждение

Результаты моделирования движения судов на примитивах дают представление о характерном количестве опасных сближений в том или ином случае. С учетом указанных зависимостей это количество может быть экстраполировано на судопотоки с другими параметрами. Значение τ – это среднее время, которое проходит между опасными сближениями судов на небольшом участке акватории. С учетом типичного времени реагирования судоводителей и ответственных за участок операторов береговых СУДС на предупреждение о риске опасного сближения и на принятие решения и совершение маневра уклонения значения τ менее 10 минут следует считать нежелательными, а менее 5 минут – опасными [5]. Например, при $R^* = 300$ м. для односторонних

судопотоков движение безопасно при острых углах их пересечения при длине интервала времени между судами как [1,20] минут, так и [1,10] минут. При пересечении двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности движение судов с интервалом [1,20] – безопасно (рис. 3, график 1), а с интервалом [1,10] – опасно (рис. 3, график 4). Это даёт представление о пропускной способности этого примитива траекторий судов. При движении, как на рис. 1в, движение с указанными интервалами безопасно. При движении, как на рис. 1г, интервал [1,20] безопасен, интервал [1,10] также безопасен (в отличие от примитива рис. 1б), хотя и находится вблизи опасной зоны. Сравнение рис. 4 и табл. 3 даёт представление о необходимости организации кругового движения при тех или иных параметрах судопотоков.

В качестве примера использования обсуждаемых результатов моделирования для планирования безопасных схем движения судов рассмотрим схему судопотоков на рис. 5а.

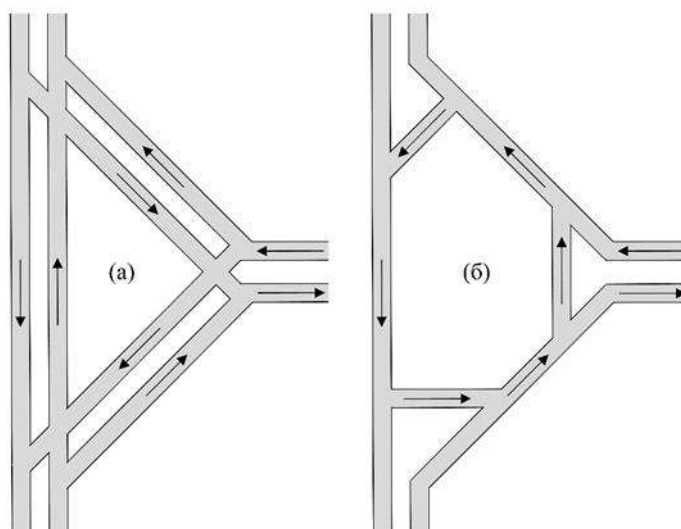


Рис. 5. Варианты схем движения судов

Здесь имеется двустороннее движение судов в направлениях «север-юг», «север-восток» и «юг-восток» таким образом, что образуется фигура, похожая на треугольник. Такой элемент трафика встречается на акваториях довольно часто: например, он присутствует у схемы движения судов в заливе Находка. В варианте рис. 5а имеется 6 пересечений односторонних судопотоков: по два пересечения под углами 45° , 135° , и 90° . Если обратиться к данным графиков рис. 2 и 3, то можно определить, что, например при $R^* = 300$ метров и случайном интервале времени между судами в отрезке [1,10] минут будем иметь значение $\tau = 2.85$ мин., которое относится к опасному диапазону.

Заменяем схему рис. 5а на эквивалентную ей по связности схему рис. 5б (похожую на круговое движение). В ней имеем всего 3 пересечения односторонних судопотоков под углом 45° , что даёт значение $\tau = 8.33$ мин., которое относится к безопасному диапазону. Пропускная способность схемы рис. 5б оказывается почти в три раза выше. Разумеется, речь идёт об идеальном случае, для вывода об опасности и пропускной способности

конкретной схемы движения реальной акватории потребуются провести более ёмкое моделирование. Тем не менее, рассматриваемый в настоящей работе подход, основанный на использовании данных моделирования движения на примитивах, даёт вполне информативные результаты.

Кроме количества опасных сближений возможны и другие метрики опасности движения. Так, в работе [10] рассматриваются метрики «интенсивность движения», «интенсивность плюс скорость движения», «интенсивность плюс размеры судов». Первая характеризует количество судов, проходящих через некоторый участок акватории за единицу времени. Вторая аналогична первой метрике, но судам соответствует «вес», зависящий от скорости движения, то есть скоростные суда дают больший вклад в метрику; так выявляются участки акватории с наибольшей скоростью. Третья аналогична второй, но «вес» судна зависит от его длины: более длинные суда имеют больший вес. Метрика выявляет участки акватории, где движутся самые большие суда. Похожие метрики, связанные с интенсивностью движения рассматриваются и в

других исследованиях [11, 12]. Следует отметить, что интенсивность движения и опасность связаны неявно, косвенно. Трафик может быть интенсивным, но безопасным или разреженным, но опасным.

В работах [10, 13] обосновывается метрика «стабильность параметров движения», которая характеризует вариативность скоростей и курсов. Она позволяет выявлять участки акватории со стабильным или нерегулярным, «хаотичным» движением. В статьях [10, 14] предложена метрика «насыщенность трафика», характеризующая плотность находящегося на участке акватории судов с точки зрения их возможности совершать манёвры.

Заключение

В работе рассматривается задача планирования схемы движения судов, обеспечивающей безопасность трафика морской акватории. Сформулированы общие модельные представления задачи, отмечается, что перебор возможных маршрутов судов (в том числе с использованием различных эвристик) не даёт возможности адекватно оценить меру их безопасности. В качестве альтернативы предлагается конструирование возможных схем движения экспертным способом из типичных конфигураций траекторий (примитивов).

Предложено 4 модели примитивов траекторий судов: пересечение односторонних судопотоков одинаковой интенсивности, двусторонних судопотоков одинаковой интенсивности, двусторонних судопотоков разной интенсивности и двусторонних судопотоков с зоной кругового движения. Отмечается, что такие структурные элементы траекторий судов широко распространены в судоводительской практике.

Результаты статистического моделирования движения судов по траекториям выбранных примитивов дают представление о характерном числе опасных сближений при тех или иных характеристиках судопотока. С учетом статистического характера задачи, величиной, характеризующей опасность того или иного примитива траекторий судов, удобно выбрать среднее время, которое проходит между опасными сближениями. Возможны и другие меры оценки опасности трафика. В работе приведён пример использования полученных результатов моделирования для планирования безопасных схем движения судов.

Предложенный подход позволяет достаточно информативно оценивать степень опасности схемы движения с качественной точки зрения. Однако трафик реальных акваторий характеризуется многообразием возможных маршрутов и траекторных свойств движущихся судов. Нередко на них присутствует множество судов, движение которых не носит характер устойчивых потоков (прогулочные катера и яхты, рыбопромысловые суда, плавсредства береговых служб и т.п.), а их движение характеризуется значительной случайной компонентой. В этом случае для решения задачи потребуются более ёмкое моделирование движения, возможно, с использованием специализированных программных систем, чему авторы планируют посвятить отдельное исследование.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90018.

Литература

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // *Journal of Navigation*. – 2009. – Vol. 62. – №3. – P. 455–476.
2. Кирсанов М.Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2016. – № 2. – С. 183-190.
3. Лентарёв А.А. Проблемы организации движения судов в дальневосточных водах // *Транспортное дело России*. – 2015. – № 6. – С. 256-257.
4. Таратынов В.П. Судовождение в стесненных районах. М.: Транспорт, 1980. – 128 с.
5. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Люлько В.И. Оценка опасности трафика морской акватории по данным Автоматической идентификационной системы // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 681-690.
6. Титов А.В., Баракат Л., Хаизаран А. Состояние и перспективы реализации технологии Е-навигации // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 621-630.
7. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Королёв О.А. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2017. – № 8. – С. 3-12.
8. Титов А.В., Баракат Л., Чанчиков В.А., Тактаров Г.А., Ковалев О.П. Системы управления безэкипажными судами // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – №1-4 (43). – С. 109-120.
9. Лентарёв А. А. Основы теории судопотоков. Владивосток: «Интермор», 1995. – 76 с.
10. Гриняк В.М., Иваненко Ю.С., Люлько В.И., Шульгина А.В., Шурыгин А.В. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8. – № 1 (28). – С. 40-41.
11. Weng J., Xue S. Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study // *Journal of Navigation*. – 2015. – Vol. 68. – Is. 03. – Pp. 602–618.
12. Wu L., Xu Y., Wang Q., Wang F., Xu Zh. Mapping global shipping density from AIS data // *Journal of Navigation*. – 2016. – Vol. 70. – Is. 01. – Pp. 67–81.
13. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 436-449.

14. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Оценка опасности схемы движения на акватории мерой нагрузки на судоводителей // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 12. – С. 35-40.

References

1. Tam Ch.K., Bucknall R., and A. Greig. (2009) Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters. *Journal of Navigation*. 62. 455–476.
2. Kirsanov M.N. (2016) Analysis of algorithms for the selection of optimal routes the group's vessels. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2. 183-190.
3. Lentarev A.A. (2015) Problems of vessel traffic organization in the Far East of Russia. *Transportnoe delo rossii*, 6. 256-257.
4. Taratynov V.P. *Sudovojdenie v stesnennih rayonah*. Moscow: Transport, 1980.
5. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., and V.I. Lulko (2017) Use of Automatic identification system data for estimation of marine traffic safety. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 9.4. 681-690.
6. Titov A.V., Barakat L., and A. Khaizaran (2019) Status and perspectives of E-navigation technology implementation. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 11.4. 621-630.
7. Malygin I.G., Komashinsky V.I., and O.A. Korolev (2017) Management information systems of water transport in the period of the fourth industrial revolution. *Transport: science, equipment, management*. 8. 3-12.
8. Titov A.V., Barakat L., Chanchikov V.A., Taktarov G.A., and O.P. Kovalev. (2019) Control systems of unmanned vessels. *Marine Intellectual Technologies*. 1. 109-120.
9. Lentarev A.A. *Osnovy teorii sudopotokov*. Vladivostok: Interomor, 1995.
10. Grinyak V.M., Ivanenko Y.S., Lulko V.I., Shulenina A.V., and A.V. Shurygin. (2020) Multi-measure navigation safety estimation and digital represent for marine area. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 8.1. 40-41.
11. Weng J., and S. Xue (2015) Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study. *Journal of Navigation*. 68.3. 602–618.
12. Wu L., Xu Y., Wang Q., Wang F., and Zh. Xu (2016) Mapping global shipping density from AIS data. *Journal of Navigation*. 70.1. 67–81.
13. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., and Y.S. Ivanenko (2020) Decision support for marine traffic control based on route clustering. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 12.3. 436-449.
14. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., and A.V. Shulenina (2019) Assessment of marine traffic safety in aquatories as a metric of impact on navigators. *Transport: science, equipment, management*. 12. 35-40.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Михайлович Гриняк, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Александр Сергеевич Девятисильный, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник сектора управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Алёна Викторовна Шуленина, старший преподаватель кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: shuleninaav@mail.ru

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Eng), professor of department of information systems and technologies, Vladivostok State University of Economics and Service, 41, Gogolya st., Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Alexander S. Devyatisilnyi, Dr. Sci. (Eng), professor, navigation and control department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Alena V. Shulenina, the senior lecturer of department of applied mathematics, mechanics, control and software, Far Eastern Federal University, 10, Ajax village, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: shuleninaav@mail.ru

Поступила в редакцию: 06.07.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

Совершенствование научно-методической базы системы организации перевозок грузов на внутреннем водном транспорте

И.К. Кузьмичев¹ e-mail: rector@vsuwt.ru, А.Г. Малышкин¹ e-mail: nauka@vsuwt.ru,
Ю.Н. Уртминцев¹ e-mail: yurtm@yandex.ru, О.Л. Домнина¹ e-mail: o-domnina@yandex.ru,
¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Актуальность темы обуславливается важным значением рациональной организации перевозок для повышения эффективности работы судоходных компаний. При этом в качестве форм организации понимаются типовые организационные подходы согласования взаимодействия между различными объектами и элементами транспортной системы. В работе проводится анализ существующих подходов к выявлению устойчивых форм организации движения, их влияние на показатели работы транспортных компаний. Авторами отмечается снижение эффективности использования флота в России, реформирование отношений в России между перевозчиками и грузовладельцами, нестабильность грузовой базы речного транспорта. Это привело к трансформации форм организации перевозок и движения флота. Поэтому многие теоретические положения в области организации работы речного флота нуждаются в адаптации к новым условиям и, следовательно, в доработке. В статье формулируются актуальные научные задачи, направленные на совершенствование научно-методического обеспечения системы организации речного судоходства в современных условиях. Предлагается система оценочных показателей, характеризующих организационные формы судоходства. Для оценки степени устойчивости схем движения судов предлагается использовать показатель, учитывающий число разных переходов судов между грузопотоками за определенный период и повторяемость этих переходов. Авторами также были сформулированы признаки, свойственные каждой из форм организации судоходства. Приводятся результаты экспериментальных расчетов оценочных показателей для крупной судоходной компании России «В.Ф.Танкер», занимающейся перевозками нефтегрузов. При этом были рассмотрены рейсы, выполненные танкерным флотом компании проекта RSD-27 за навигацию.

Ключевые слова: внутренний водный транспорт, организация перевозок, линейная и рейсовая формы организации движения флота, линейное судоходство, последовательные рейсы, трамповое судоходство

Improvement of the scientific and methodological base of the system of organization of cargo transportation on inland water transport

Igor K. Kuzmichev¹ e-mail: rector@vsuwt.ru, Alexander G Malyshkin¹ e-mail: nauka@vsuwt.ru,
Yuri N. Urtmintsev¹ e-mail: yurtm@yandex.ru, Olga L. Domnina¹ e-mail: o-domnina@yandex.ru
¹Volga State University of Water Transport

Abstract. The relevance of the topic is determined by the importance of rational organization of transportation to improve the efficiency of shipping companies. At the same time, typical organizational approaches to coordination of interaction between various objects and elements of the transport system are understood as forms of organization. The paper analyzes the existing approaches to identifying sustainable forms of traffic management, their impact on the performance of transport companies. The authors note the decline in the efficiency of fleet use in Russia, the reformatting of relations in Russia between carriers and cargo owners, and the instability of the cargo base of river transport. This led to the transformation of the forms of organization of transportation and fleet movement. Therefore, many theoretical provisions in the field of organizing the work of the river fleet need to be adapted to new conditions and, consequently, to be finalized. The article formulates actual scientific tasks aimed at improving the scientific and methodological support of the system of river navigation organization in modern conditions. A system of evaluation indicators that characterize the organizational forms of navigation is proposed. To assess the degree of stability of ship traffic patterns, it is proposed to use an indicator that takes into account the number of different transitions of ships between cargo flows over a certain period and the repeatability of these transitions. The authors also formulated the features inherent in each of the forms of navigation organization. The results of experimental calculations of estimated indicators for a large Russian shipping company "V. F. Tanker", which is engaged in the transportation of oil and gas cargo. At the same time, the flights performed by the tanker fleet of the RSD-27 project company for navigation were considered.

Keywords: inland water transport, organization of transportation, linear and regular forms of organization of fleet movement, linear navigation, consecutive voyages, tram navigation

Введение

Для эффективной работы судоходной компании и создания грузовладельцам условий для четкого выполнения договоров поставки важное значение имеет рациональная организация перевозок. Речной флот в процессе своей работы флот технологически и организационно взаимодействует с разными объектами транспортной системы (грузоотправителями, грузополучателями, портами, смежными видами транспорта, шлюзами,

судоремонтными предприятиями, и др.). Поскольку технологически и организационно, его работа нуждается в согласовании с работой этих объектов. Такие типовые организационные подходы согласования можно рассматривать как формы организации перевозок и движения флота.

Как отмечается в работе [1] при организации поставок универсальное решение проблемы можно предложить только для ограниченного сегмента предприятий, поскольку одинакового решения по увеличению эффективности затрат для предприятий

разной специализации и масштаба деятельности не существует.

Вопросами организации отдельных элементов организации работы флота занимались многие ученые из разных стран. В работе [2] обсуждаются условия, при которых консолидация грузопотоков может быть выгодной.

Следует отметить, что внутренний водный транспорт, как правило, обслуживает перевозки массовых грузов, что предполагает многократное отправление судов из пунктов погрузки. Для таких перевозок целесообразно применение устойчивых форм организационной работы. При этом на внутреннем водном и морском видах транспорта транспорте есть некоторое различие в классификации форм судоходства. Так, на внутренних перевозках выделяются две характерные формы – линейная (освоение грузопотока однотипными судами с определенным интервалом движения) и рейсовая (осуществление перевозок судами любого типа и без установленной регулярности).

Эксплуатационная наука на морском транспорте, в отличие от речного, традиционно выделяет три формы организации судоходства: линейную, работу судов последовательными рейсами и трамповую. Первые две относятся к регулярному судоходству, последняя – к нерегулярному.

Трамповая форма идентична рейсовому судоходству на речном транспорте. Договор на перевозку между судовладельцем и грузовладельцем заключается, как правило, на каждый отдельный рейс. Линейная форма в морском судоходстве содержит более жесткие требования (по сравнению с речным транспортом) к организации движения судов на линии: суда должны работать по заранее объявленному расписанию (графику), с последовательным заходом в определенные порты и с публичными тарифами. Такая форма хорошо подходит и широко используется на перевозках контейнеров и других штучных грузов, предъявляемых, как правило, ограниченными партиями и большим числом грузовладельцев. При этом договор на перевозку оформляется между судовладельцем и грузовладельцем в форме коносамента непосредственно перед погрузкой груза. Организация такой линии несет для судовладельца естественный риск неполной загрузки судов.

Работа судов «последовательными рейсами» предполагает закрепление за группой грузопотоков группы однотипных судов. В этом случае суда многократно отправляются по грузопотокам нерегулярно (без установленного интервала). Такая форма судоходства применяется при освоении достаточно больших объемов массовых грузов. Договор между грузовладельцем и судовладельцем составляется на каждом грузопотоке на определенный объем перевозок. Для освоения объема предусматривается выполнение нескольких рейсов в течение согласованного периода времени.

Линейная форма судоходства позволяет на стадии планирования моделировать и оптимизировать работу флота [3,4,5,6]. Часть работ в качестве целей проектирования ставит минимизацию общих затрат в горизонте планирования, включая: затраты на погрузку-выгрузку, штрафные санкции,

затраты на простой в портах перевалки, затраты на складирование и транспортировку как с грузом, так и порожнем [3,4,5, 7, 8]. Отмечается, что на внутренних перевозках линейная форма организации является преобладающей [8]. Для нее, по мнению авторов, необходимо уделять внимание технологическим инновациям и сотрудничеству с фрахтователями и владельцами терминалов [8]. Анализ проблем проектирования сети интермодальной линейной системы судоходства приведен и в работе [9]. Проектированию контейнерных линейных перевозок также посвящены работы [2-4, 10-16]. Отмечается, что одной из главных особенностей линейных перевозок является регулярная работа служб по заранее установленному графику [12]. Услуги по перевозке в этом случае должны быть циклическими, как правило с соблюдением еженедельных отправок. Они могут быть разделены на несколько типов в зависимости от количества отправок. Подробный обзор исследований по проблемам оптимизации линейных перевозок представлен в обзорных статьях [13-16].

Авторами исследования [14] отмечается, что для линейных перевозок важно разработать инструменты поддержки принятия решений, которые могут помочь разработать более экономичные услуги и сбалансировать несколько целей. Так как проблемы проектирования линейной формы судоходства сложны из-за большого количества ограничений в реальной жизни, необходимо изучение упрощенных проблем, которые легче анализировать. Для этого и необходимо определиться с особенностями организации работы флота.

Рейсовая форма судоходства [17,18], в отличие от линейной, отличается большей гибкостью и применяется для освоения небольших по объему и неустойчивых грузопотоков. Однако она также требует постоянных регулировочных решений. В работе [17] представлена модель смешанного целочисленного программирования для этой задачи и предложена адаптивная эвристика, основанная на поиске больших окрестностей. В работе [18] речь идет об определении состава флота, с учетом гибких отклонений от базы и возможностью соединения судов путем замены их расписаний.

За последние десятилетия в России значительно снизилась эффективность использования флота. Это произошло, прежде всего, из-за неустойчивого характера современных грузопотоков, ухудшения состояния водных путей и возросшей конкуренции со стороны смежных видов транспорта. Речные предприятия потеряли часть своей грузовой базы, которая перешла на железнодорожный и, частично, автомобильный виды транспорта.

Определенную роль в ухудшении качества использования флота сыграло снижение уровня организованности транспортного процесса. Теоретические основы организации работы флота, заложенные в период плановой экономики, нуждаются в адаптации к современным условиям. В связи со сказанным, целью нашего исследования является доработка научно-методической базы в сфере организационных форм работы флота.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ существующих форм организации перевозок и движения флота, применяемых на практике речными судоходными компаниями.
2. Формулировка четких признаков, характерных для каждой формы организации судоходства.
3. Разработка оценочных показателей, характеризующих систему организации перевозок и систему организации движения флота.

Материалы и методы

Анализ существующих форм организации перевозок и движения флота, применяемых на практике речными судоходными компаниями, проводился путем анализа сложившейся практики на Российском рынке речных перевозок. На основании проведенного анализа методом обобщения были сформулированы четкие признаки, характерные для каждой формы организации судоходства.

Разработка оценочных показателей, характеризующих систему организации перевозок и систему организации движения флота позволит более глубоко и объективно провести анализ применяемых в настоящее время на перевозках организационных систем и выработать критерии для отнесения их к той или иной форме судоходства.

Оценочные показатели, на наш взгляд, должны учитывать:

- наличие факта распределения судов по участкам работы (по грузопотокам);
- число грузопотоков, закрепленных за определенной группой флота;
- степень закрепления судов за группой грузопотоков;
- степень устойчивости схемы движения судов (порядка перехода между грузопотоками);
- степень регулярности перевозок;
- уровень ритмичности отправления судов на грузопотоках.

Очевидно, что все формы судоходства отличаются между собой, прежде всего, степенью устойчивости схем движения судов и стабильности графика (ритма) отправления судов по грузопотокам. Самые устойчивые схемы и стабильный график – при линейном судоходстве, самые неустойчивые и нестабильные – при рейсовом.

Для оценки степени устойчивости схем движения судов может быть использован показатель, учитывающий число разных переходов судов между грузопотоками за определенный период и повторяемость этих переходов. Общий методический подход для расчета данного показателя состоит в следующем.

На первом этапе устанавливается группа флота для проведения исследования. Как правило, это группа однотипных судов, работающих в рамках смежных водных бассейнов.

На втором этапе определяется совокупность грузопотоков, на освоении которых используется рассматриваемая группа флота.

На третьем этапе рассчитывается показатель устойчивости для каждого грузопотока, обслуживаемого группой флота:

$$k_{уст\ i} = \frac{\max_j(n_{ij})}{\sum_j n_{ij}} \quad (1)$$

где I – множество грузопотоков, на которых используется группа флота, ($i \in I, j \in I$),

n_{ij} – количество переходов судов с i -го грузопотока на j -й;

$\sum_j n_{ij}$ – сумма всех переходов с i -го грузопотока на другие.

На четвертом этапе определяется среднее (средневзвешенное) значение показателя для группы грузопотоков:

$$\bar{k}_{уст} = \frac{\sum_i k_{уст\ i} * \sum_j n_{ij}}{\sum_i \sum_j n_{ij}} \quad (2)$$

где $\sum_i \sum_j n_{ij}$ – сумма всех переходов судов между грузопотоками в рамках рассматриваемой группы.

Степень регулярности перевозок на грузопотоке может быть определена на основе сравнения объемов отправления грузов по календарным отрезкам внутри периода освоения грузопотока. Соответствующий показатель может быть рассчитан через среднее относительное отклонение объемов отправления грузов по календарным отрезкам:

$$k_{рег} = 1 - \frac{\sum_j |G_j - G_{cp}|}{nG_{cp}}, \quad (3)$$

Здесь: G_j – объем отправления груза на грузопотоке в j -м календарном отрезке;

G_{cp} – средний объем отправления груза за календарный отрезок;

n – число календарных отрезков в течение периода освоения грузопотока.

В качестве календарных отрезков целесообразно принять декаду или пятидневку (в зависимости от плотности грузопотока).

Для оценки степени ритмичности отправления судов на грузопотоке могут быть использованы следующие параметры:

$$k_{р\text{тм}} = 1 - \frac{\sum_i |t_{ni} - t_{иср}|}{mt_{иср}}, \quad (4)$$

$$t_i^{max}, t_i^{min} \quad (5)$$

Здесь:

$k_{р\text{тм}}$ – показатель (коэффициент) ритмичности движения (отправления) судов на грузопотоке;

m – общее количество отправок судов на грузопотоке (размер судового потока);

t_{i-} – интервал времени между отправлением i -го и последующего судов на грузопотоке, сут.;

$t_{i^{cp}}$ – среднее значения интервала движения (отправления) судов на грузопотоке, сут.;

$t_{i^{min}}, t_{i^{max}}$ – соответственно минимальный и максимальный интервалы отправления судов на грузопотоке;

Значение коэффициента ритмичности движения (отправления) судов более 0,7 говорит о наличии определенного ритма перевозок на грузопотоке, значение менее 0,3 – о полном его отсутствии.

Результаты

На российском рынке речных перевозок объемы перевозок снизились почти в два раза с 1990 года (рис.1) и, соответственно, снизилось количество "устойчивых" грузопотоков. При этом искусственная организация постоянных грузовых линий нецелесообразна.

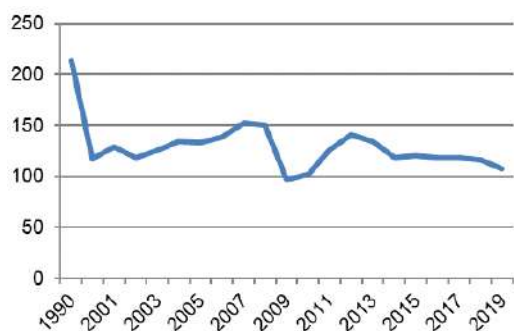


Рис.1. Динамика объемов перевозок грузов внутренним водным транспортом с 1990 по 2019 годы [составлено авторами на основании данных Росстата <https://rosstat.gov.ru/folder/23455>]

Поэтому многие судоходные предприятия стали применять промежуточную между линейную и рейсовую форму судоходства. Для этого группа флота закрепляется не за определенным маршрутом, включающим небольшое количество грузопотоков (один-два), а за группой четыре и более грузопотоков. Это позволяет каждой группе флота на уровне текущего планирования на основании моделирования и расчетов технико-экономических показателей подобрать группу обслуживаемых грузопотоков с возможностью оперативного перераспределения судов составляющими эту группу грузопотоков. Подобная форма судоходства близка «работе судов последовательными рейсами» на морском транспорте.

В последние годы в силу неустойчивости грузопотоков описанная форма судоходства на речном транспорте стала довольно распространенной. Поэтому в настоящее время в договорах перевозки между грузовладельцами и судоходными компаниями не всегда прописывается объем перевозок. Он в силу изменчивости определяется дополнительными соглашениями к договорам и может колебаться в течении

навигации. Описанная форма судоходства менее подвержена риску и является более устойчивой изменению объемов грузопотоков, нежели линейная.

Исходя из сказанного, авторами были сформулированы признаки, свойственной каждой из форм организации судоходства. Так, например, признаками формы «работы судов последовательными рейсами» являются:

- наличие грузопотоков, которые могут перевозиться одной группой флота;
- на перевозках используются суда с похожими характеристиками;
- грузы предъявляются в течение значительного интервала времени (например, навигационного периода или большей его части);
- отправление судов осуществляется хоть и без постоянного интервала, но многократно по каждому грузопотоку;
- присутствуют похожие маршруты движения с ограниченным переходом флота между грузопотоками.

Далее авторами были проведены экспериментальные расчеты представленных выше показателей для некоторых речных перевозчиков, работающих на Единой глубоководной системе России, в частности, для крупной судоходной компании «В.Ф.Танкер», занимающейся перевозками нефтегрузов (в настоящее время вошла в СК «Волжское пароходство»). При этом были рассмотрены все рейсы, совершенные группой однотипного танкерного флота (проекта RSD-27) этой компании в течение навигационного периода. Анализ выполненных перевозок показал, что группа флота использовалась на освоении шести укрупненных грузопотоков с многократными переходами между ними.

Число совершенных группой флота рейсов по каждому грузопотоку и значения оценочных показателей для отдельных грузопотоков и группы флота в целом приведены в табл.1.

Таблица 1

Расчет оценочных характеристик организационных форм судоходства

№ п/п	Наименование грузопотока	Число груженых рейсов	Коэффициент устойчивости схем переходов для грузопотока	Коэффициент устойчивости схем движения судов	Показатели	
					регулярности перевозок	ритмичности движения
1	Самара, Яблоневый овраг, Октябрьск – Кавказ, мазут	21	0,52	0,76	0,39	0,30
2	Волгоград – Кавказ, мазут	58	0,67			
3	Ярославль – порты Финского залива, газойль	4	0,75		0,53	0,22
4	Ростов-на-Дону – порты Черного моря, битум	143	0,86			
5	Саратов – Кавказ, газойль	14	0,36			
6	Набережные Челны, Бетьки – порты Финского залива, нефтепродукты	7	0,86			

Примечание: показатели регулярности перевозок и ритмичности движения (отправления) судов рассчитывались только для крупных грузопотоков

По результатам расчетов среднее значение показателя устойчивости схем движения судов для группы флота составило 0,76. Этот показатель относительно высокий и показывает, что в целом

схемы переходов судов между грузопотоками достаточно стабильны. Особенно устойчивой является схема освоения грузопотока Ростов – Черное море. Коэффициент устойчивости этой

схемы равен 0,86. Это позволяет говорить об использовании на этих перевозках линейной формы («линия-вертушка»). Все остальные грузопотоки осваиваются по системе «последовательных рейсов». В первом приближении для идентификации форм организации работы флота может быть использована следующая градация: при $K_{уст}$ менее 0,3 – рейсовая форма, 0,4-0,8 – работа судов последовательными рейсами и от 0,8-1 линейная форма организации работы флота.

Показатель регулярности перевозок определялся только для крупных грузопотоков, предполагающих многократное отправление судов в течение относительно длительного периода. Значение этого показателя для рассмотренных грузопотоков составило порядка 0,4–0,5. Это говорит о регулярности перевозок, но со значительными колебаниями по календарным отрезкам. Число отправок за пятидневку колебалось от нуля до пяти.

Показатель ритмичности движения (отправления) судов на грузопотоках составил 0,2-0,3, что свидетельствует о низком уровне ритмичности перевозок. Интервал отправления судов на грузопотоках изменялся от 1 до 16 суток.

Обсуждение

Очевидно, что применение той или иной формы судоходства затрагивает интересы и грузовладельца, и судовладельца. Поэтому целесообразно дифференцировать понятие «форма судоходства» на две составляющих: «форма организации перевозок» и «форма организации движения флота».

Первая составляющая отражает порядок подачи и движения флота на конкретном грузопотоке. Она затрагивает интересы и грузовладельца, и судовладельца. Документальное закрепление этой формы получает в заключаемом между ними договоре о перевозке.

Вторая составляющая определяет порядок организации движения определенной группы судов и перемещения их между грузопотоками в процессе обеспечения выполнения предусмотренных договорами с грузовладельцами параметров организации перевозок. Эти организационные вопросы (определение графика или ритма подачи судов в порты погрузки/выгрузки и порядка перехода судов между грузопотоками) должен решать сам судовладелец, добиваясь выполнения согласованных с клиентами графиков подачи судов и достижения при этом максимально возможной эффективности работы флота. Документальное закрепление этой формы получает в таких плановых документах судоходной компании, как «Схема (план) освоения перевозок», «Декадный план подачи судов под погрузку» и др.

Исследования в области форм судоходства, на наш взгляд, должны проводиться в следующих направлениях.

1. Анализ преимуществ и недостатков той или иной формы организации перевозок для судовладельца и для грузовладельца, включающий в себя анализ следующих аспектов:

- влияние формы организации перевозок на результаты производственно-экономической деятельности грузовладельцев, в т.ч. на размер

страховых товарных запасов, величину транспортно-логистических издержек и т.д. (с учетом вида груза, интенсивности грузопотока, неравномерности его по времени и др.);

- влияние форм организации перевозок и организации движения флота на уровень производственной и экономической эффективности использования флота, в т.ч. на производительность работы флота и себестоимость перевозок (с учетом состава флота, структуры и характеристик грузопотоков и др.);

- условия и механизм нахождения компромиссного решения для грузовладельца и судовладельца в части выбора и согласования формы организации перевозок.

2. Исследование условий тяготения грузопотоков к освоению той или иной формой организации перевозок с учетом характеристик грузопотока (особенностей производства и сбыта продукции, её стоимости, возможности и условий накопления на складах предприятий и транспортных терминалов, мощности грузопотока, взаимодействия со смежными видами транспорта и т.д.).

3. Исследование диалектической взаимосвязи между устойчивостью форм организации движения флота и их гибкостью, которое включает в себя анализ влияния системы организации движения флота (число и состав грузопотоков, закрепленных за группой флота, порядок перехода судов между грузопотоками) на характеристики системы организации перевозок (возможность достижения определенного уровня ритмичности подачи флота под загрузку, возможность гибко изменять плановый график подачи судов в порты).

Поскольку выбор формы организации перевозок затрагивает интересы и грузовладельца, и судовладельца, критериальный показатель должен носить компромиссный характер. Обе стороны заключения договоров на перевозку должны уметь возможность заранее провести экономическую оценку возможных решений.

Заключение

Теоретические основы организации работы транспортного флота, заложенные в середине двадцатого века, нуждаются в совершенствовании с учетом современных условий деятельности речного транспорта. Решение поставленных выше задач позволит провести модернизацию методической основы для решения задач в области организации работы флота. Судовладельцы получат аналитический инструмент для оценки влияния разных форм судоходства как на результаты своей производственно-экономической деятельности (ритмичность транспортного процесса, потребность во флоте, производительность работы флота, себестоимость перевозок и т.д.), так и на результаты деятельности грузовладельцев (транспортно-логистические издержки, ритмичность товарных поставок, величину страховых товарных запасов, время стоянки подвижного состава транспорта в транспортных узлах т.д.).

Это позволит проводить более объективное обоснование форм судоходства для конкретных условий и будет способствовать повышению конкурентоспособности предприятий речного транспорта.

Литература

1. Dzenzeliuk, N., Domnina, O., Morgunova, N., Zatsarinnaya, E. The impact of cost allocation on key decisions of supply chain participants. *International Journal of Supply Chain Management*. 2020. №.9(1), с. 552-558
2. Yun Fan, Behzad Behdani, Rob Zuidwijk Flow consolidation in hinterland container transport: An analysis for perishable and dry cargo, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Volume 130, Pages 128-160 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.08.011>
3. Pablo E. Achurra-Gonzalez, Matteo Novati, Roxane Foulser-Piggott, Daniel J. Graham, Gary Bowman, Michael G.H. Bell Panagiotis Angeloudis Modelling the impact of liner shipping network perturbations on container cargo routing: Southeast Asia to Europe application, *Accident Analysis & Prevention*. 2019. Volume 123. Pages 399-410 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.030>
4. Dong-Ping Song, Jing-Xin Dong Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes, *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012. Volume 46. Issue 10. Pages 1556-1575 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>
5. Alessio Trivella, Francesco Corman, David Pisinger The multi-commodity network flow problem with soft transit time constraints: Application to liner shipping, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Volume 150 Article 102342 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102342>
6. Berit D. Brouer, Jakob Dirksen, David Pisinger, Christian E.M. Plum, BoVaaben The Vessel Schedule Recovery Problem (VSRP) – A MIP model for handling disruptions in liner shipping, *European Journal of Operational Research*. 2013. Volume 224. Issue 2. Pages 362-374 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.016>
7. Baoli Liu, Zhi-Chun Li, Dian Sheng, Yadong Wang Integrated planning of berth allocation and vessel sequencing in a seaport with one-way navigation channel, *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021, Volume 143, Pages 23-47 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.010>
8. Christa Sys, Eddy VandeVoorde, Edwin van Hassel Pathways for a sustainable future inland water transport: A case study for the European inland navigation sector, *Case Studies on Transport Policy*. 2020. Volume 8. Issue 3. Pages 686-699 <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.07.013>
9. Zhiyuan Liu, Qiang Meng, Shuaian Wang, Zhuo Sun Global intermodal liner shipping network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2014. Volume 61, Pages 28-39 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.006>
10. F. Hennig, B. Nygreen, P. H. Warrick Maritime crude oil transportation – A split pickup and split delivery problem. *European Journal of Operational Research*. 2012. Volume 218, Issue 3, Pages 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.046>
11. Sonja M. Russo, Jana Voegl, Patrick Hirsch A multi-method approach to design urban logistics hubs for cooperative use. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Volume 69. Article 102847 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102847>
12. Marielle Christiansen, Erik Hellsten, Charlotte Vilhelmsen Liner shipping network design. *European Journal of Operational Research*. 2020, Volume 286, Issue 1, Pages 1-20 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.057>
13. B.D. Brouer, C. Karsten, D. Pisinger Big data optimization in maritime logistics, A. Emrouznejad (Ed.), *Big data optimization: Recent developments and challenges*, Studies in Big Data, 18, Springer International Publishing 2016. pp. 319-344
14. B.D. Brouer, C.V. Karsten, D. Pisinger Optimization in liner shipping. 2017. *4OR*, 15 (1), pp. 1-35
15. M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, D. Ronen Ship routing and scheduling in the new millennium, *European Journal of Operational Research*. Christiansen, K. Fagerholt, D. Ronen Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science*. 2004. 38 (1). pp. 1-18
16. Chung-Yee Lee, Dong-Ping Song Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. 95 (2017) pp. 442-474
17. Jongsung Lee, Byung-In Kim Industrial ship routing problem with split delivery and two types of vessels. *Expert Systems with Applications*. 2015. Volume 42, Issue 22, Pages 9012-9023 <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.059>
18. Yauheni Kisialiou, Irina Gribkovskaia, Gilbert Laporte The periodic supply vessel planning problem with flexible departure times and coupled vessels. *Computers & Operations Research*. 2018. Volume 94, Pages 52-64 <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.008>

References

1. Dzenzeliuk, N., Domnina, O., Morgunova, N., Zatsarinnaya, E. The impact of cost allocation on key decisions of supply chain participants. *International Journal of Supply Chain Management*. 2020. №.9(1), с. 552-558
2. Yun Fan, Behzad Behdani, Rob Zuidwijk Flow consolidation in hinterland container transport: An analysis for perishable and dry cargo, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Volume 130, Pages 128-160 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.08.011>
3. Pablo E. Achurra-Gonzalez, Matteo Novati, Roxane Foulser-Piggott, Daniel J. Graham, Gary Bowman, Michael G.H. Bell Panagiotis Angeloudis Modelling the impact of liner shipping network perturbations on container cargo routing: Southeast Asia to Europe application, *Accident Analysis & Prevention*. 2019. Volume 123. Pages 399-410 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.030>
4. Dong-Ping Song, Jing-Xin Dong Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes, *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012. Volume 46. Issue 10. Pages 1556-1575 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>

5. Alessio Trivella, Francesco Corman, David Pisinger The multi-commodity network flow problem with soft transit time constraints: Application to liner shipping, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Volume 150 Article 102342 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102342>
6. Berit D. Brouer, Jakob Dirksen, David Pisinger, Christian E.M. Plum, BoVaaben The Vessel Schedule Recovery Problem (VSRP) – A MIP model for handling disruptions in liner shipping, *European Journal of Operational Research*. 2013. Volume 224. Issue 2. Pages 362-374 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.016>
7. Baoli Liu, Zhi-Chun Li, Dian Sheng, Yadong Wang Integrated planning of berth allocation and vessel sequencing in a seaport with one-way navigation channel, *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021, Volume 143, Pages 23-47 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.010>
8. Christa Sys, Eddy VandeVoorde, Edwinvan Hassel Pathways for a sustainable future inland water transport: A case study for the European inland navigation sector, *Case Studies on Transport Policy*. 2020. Volume 8. Issue 3. Pages 686-699 <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.07.013>
9. Zhiyuan Liu, Qiang Meng, Shuai Wang, Zhuo Sun Global intermodal liner shipping network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2014. Volume 61, Pages 28-39 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.006>
10. F. Hennig, B. Nygreen, P. H. Warrick Maritime crude oil transportation – A split pickup and split delivery problem. *European Journal of Operational Research*. 2012. Volume 218, Issue 3, Pages 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.046>
11. Sonja M. Russo, Jana Voegl, Patrick Hirsch A multi-method approach to design urban logistics hubs for cooperative use. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Volume 69. Article 102847 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102847>
12. Marielle Christiansen, Erik Hellsten, Charlotte Vilhelmsen Liner shipping network design. *European Journal of Operational Research*. 2020, Volume 286, Issue 1, Pages 1-20 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.057>
13. B.D. Brouer, C. Karsten, D. Pisinger Big data optimization in maritime logistics, A. Emrouznejad (Ed.), *Big data optimization: Recent developments and challenges*, Studies in Big Data, 18, Springer International Publishing 2016. pp. 319-344
14. B.D. Brouer, C.V. Karsten, D. Pisinger Optimization in liner shipping. 2017. *4OR*, 15 (1), pp. 1-35
15. M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, D. Ronen Ship routing and scheduling in the new millennium, *European Journal of Operational Research*. Christiansen, K. Fagerholt, D. Ronen Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science*. 2004. 38 (1). pp. 1-18
16. Chung-Yee Lee, Dong-Ping Song Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. 95 (2017) pp. 442-474
17. Jongsung Lee, Byung-In Kim Industrial ship routing problem with split delivery and two types of vessels. *Expert Systems with Applications*. 2015. Volume 42, Issue 22, Pages 9012-9023 <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.059>
18. Yauheni Kisialiou, Irina Gribkovskaia, Gilbert Laporte The periodic supply vessel planning problem with flexible departure times and coupled vessels. *Computers & Operations Research*. 2018. Volume 94, Pages 52-64 <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.008>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузьмичев Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, ректор., Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: rector@vsuwt.ru

Igor K. Kuzmichev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Rector, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: rector@vsuwt.ru

Александр Георгиевич Малышкин, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nauka@vsuwt.ru

Alexander G Malyshkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief Researcher of the Department of Transport Management, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: nauka@vsuwt.ru

Юрий Николаевич Уртминцев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yurtm@yandex.ru

Yuri N. Urtmintsev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Transport Management, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: yurtm@yandex.ru

Ольга Леонидовна Домнина, кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Olga L. Domnina, Ph.D.(Eng), Associate Professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Поступила в редакцию: 05.07.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 551.2:502.3

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.016>

Автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования земли при анализе рисков аварийных разливов нефтепродуктов на водной поверхности

И.Г. Малыгин¹ e-mail: malygin_com@mail.ru, О.В. Ложкина^{1,2} e-mail: olojkina@yandex.ru,
В.А. Онов² e-mail: onov.va@igps.ru, Н.В. Остудин³ e-mail: ostudin92@mail.ru,
М.В. Панкратова² e-mail: r.masha-oskol@mail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России,

³Центральный аппарат МЧС России

Аннотация. Цель настоящей работы заключалась в повышении эффективности функционирования оперативно-дежурных смен путём системного анализа и синтеза системы организованного управления оперативно-дежурных смен центров управления в кризисных ситуациях. Одной из важнейших задач является задача выбора рациональной модели представления знаний. В статье в виде математической (комбинированной) модели процесса выбора рациональной модели представления знаний реализована подсистема выбора рациональной модели представления знаний. В ходе работы был выделен перечень классификационных признаков и их значений, которые позволяют определить соответствие между задачами должностного лица ЦУКС МЧС России и моделями представления знаний. Для удобства работы с полученными данными был успешно реализован метод свертки критериев. Были получены интегральные показатели по каждой модели: производственной, фреймовой, логической и модели в виде семантических сетей. Результаты, полученные с упором на специфику современных информационно-аналитических систем, основанных на работе с искусственным интеллектом и базами знаний, способствуют повышению эффективности функционирования органов управления МЧС России при мониторинге и прогнозировании чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: анализ рисков, системный анализ, дистанционное зондирование, космический мониторинг, разлив нефтепродуктов, МЧС России, структурный синтез, нейросетевое моделирование, логическая модель.

Automated processing of remote sensing data in the analysis of the risks of accidental oil spills on water surface

Igor G. Malygin¹ e-mail: malygin_com@mail.ru, Olga V. Lozhkina^{1,2} e-mail: olojkina@yandex.ru,
Vitaly A. Onov² e-mail: onov.va@igps.ru, Nikita V. Ostudin³ e-mail: ostudin92@mail.ru,
Maria V. Pankratova² e-mail: masha-oskol@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation

²St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

³Central office of EMERCOM of Russia

Abstract. The purpose of this work was to improve the efficiency of the operation of operational duty shifts by system analysis and synthesis of the system of organized management of operational duty shifts of control centers in crisis situations. One of the most important tasks is the task of choosing a rational model of knowledge representation. In the article, the subsystem of choosing a rational model of knowledge representation is implemented in the form of a mathematical (combined) model of the process of choosing a rational model of knowledge representation. In the course of the work, a list of classification features and the corresponding values of the features were identified, which make it possible to determine whether the solution of the problem of an official of the Center of management in crisis situations of the Ministry of EMERCOM of Russia belongs to the knowledge representation model. For the convenience of working with the received data, the method of convolution of criteria was successfully implemented. Integral indicators were obtained for each model: production, frame, logical, and semantic network models. The results obtained with an emphasis on the specifics of modern information and analytical systems based on artificial intelligence and knowledge bases contribute to improving the efficiency of the management bodies of the EMERCOM of Russia in monitoring and forecasting emergencies.

Keywords: risk analysis, system analysis, remote sensing, space monitoring, oil spill, EMERCOM of Russia, structural synthesis, neural network modeling, logical model.

Введение

В МЧС России эффективно используются данные системы космического мониторинга. Космическая информация принимается и обрабатывается в ежесуточном режиме. Работа ведётся как в оперативном режиме, так и в случае работы по «архивным» чрезвычайным ситуациям.

Полученная информация позволяет осуществлять комплекс мер по недопущению угрозы населению со стороны опасных факторов природных

ЧС, в том числе, используя возможности компьютерного моделирования.

Условно зоны применения возможностей космического мониторинга можно разделить на следующие аспекты [1]:

- мониторинга паводковой обстановки;
- мониторинг лес пожарной обстановки;
- мониторинга ледовой обстановки;
- мониторинг гидротехнических и природных явлений;
- поиск различных объектов.

Современные способы автоматизированной обработки данных позволяют в круглосуточном режиме получать информацию о термических аномалиях на территории Российской Федерации.

Поскольку система космического мониторинга МЧС России является составной частью общей системы антикризисного управления, то необходимо провести синтез соответствующей системы организованного управления.

Системы организованного управления представляют собой сложную структуру с централизованным управлением [2-4]. Если в

качестве системы организованного управления рассматривать оперативно-дежурные смены центров управления в кризисных ситуациях МЧС России, то в качестве управляющего органа можно рассматривать старшего оперативного дежурного центра управления в кризисных ситуациях. Объектом управления является непосредственно сама оперативно-дежурная смена, которая представляет собой социальную систему, элементами которой являются должностные лица ЦУКС и связи между ними (рис.1).

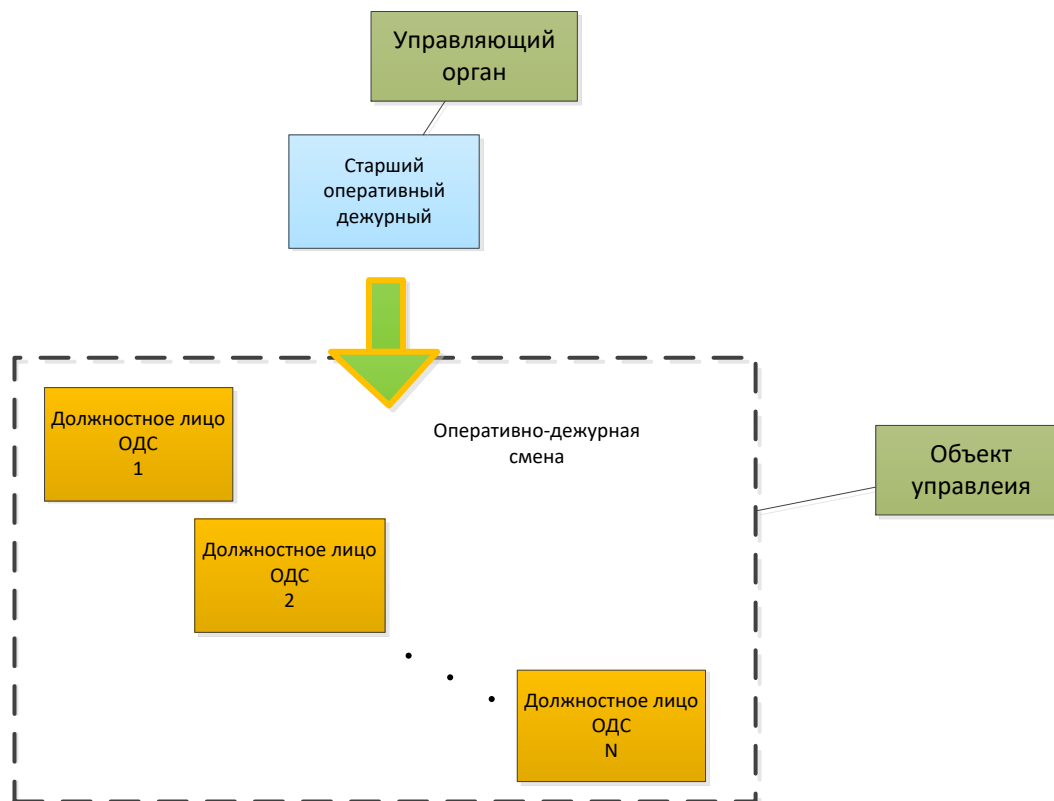


Рис. 1. Система организованного управления оперативно-дежурных смен, как система с управлением

1. Модели и методы, позволяющие повысить эффективность принятия решений по ликвидации на ЧС

В вопросах научного обоснования эффективности функционирования центров управления в кризисных ситуациях МЧС России актуальными являются вопросы организации оперативного дежурства при реагировании на ЧС и выполнении в повседневном режиме задач по предназначению.

Эффективность функционирования оперативно-дежурных смен может быть повышена путём системного анализа и синтеза системы организованного управления оперативно-дежурных смен центров управления в кризисных ситуациях (рис. 2) [5]. При этом положительный эффект

достигается при структурном или функциональном преобразовании сложной системы. Современное развитие информационных технологий позволяет активно использовать системы искусственного интеллекта при описании и совершенствовании сложных систем. Таким образом, закономерности, присущие системе искусственного интеллекта, могут быть переложены на систему организованного управления оперативно-дежурных смен антикризисного управления МЧС России [2-5].

Аппарат системного анализа позволяет оценить функциональную и структурную особенность системы организованного управления оперативно-дежурных смен путем декомпозиции различных элементов системы.

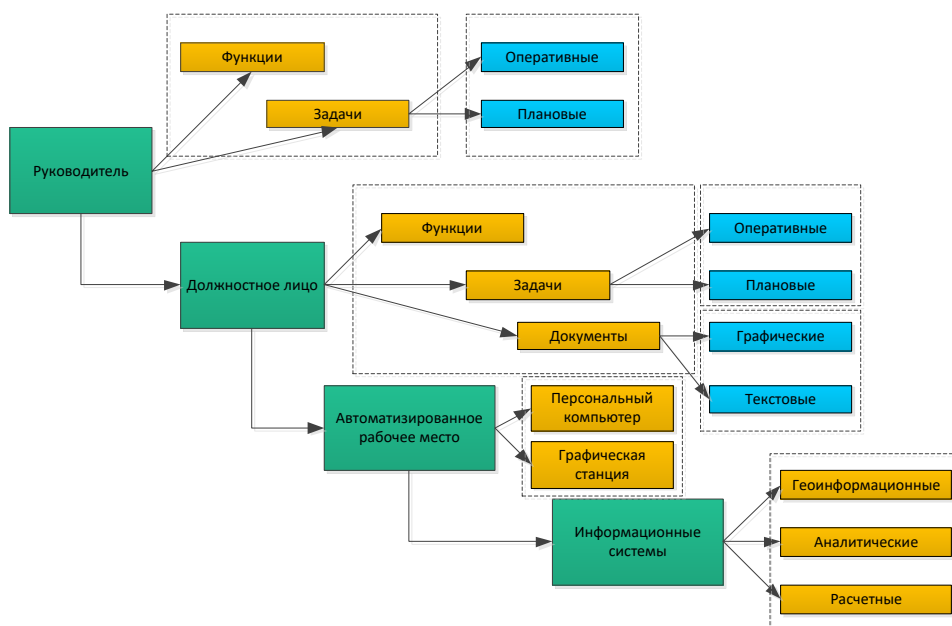


Рис. 2. Структурный синтез системы организованного управления оперативно-дежурных смен

Анализ связей и нейросетевое моделирование движения информационных потоков в системе позволит повысить существующие значения показателей качества выполнения специалистами оперативно-дежурных смен своих функциональных обязанностей, а как следствие повысить эффективность принятия решений по ликвидации на ЧС [6]. Переложение части задач на системы искусственного интеллекта позволят автоматизировать процессы антикризисного управления при реагировании на ЧС природного характера, в том числе при анализе рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера, связанных с разливами нефтепродуктов на водной поверхности (рис.3).



Рис. 3. Пример детектирования разливов нефтепродуктов в реке Амбарная Красноярского края

2. Выбор рациональной модели путем реализации метода свертки критериев

Принципиальной задачей является нейросетевое моделирование способов и принципов хранения и накопления знаний в системе [7]. Одной из проблем, возникающих при разработке систем интеллектуальной поддержки деятельности должностных лиц органов управления, является выбор рациональной модели представления знаний. Подсистема выбора рациональной модели представлена в виде математической модели процесса выбора рациональной модели представления знаний. На рисунке 4 представлен перечень классификационных признаков и их значений, позволяющих установить соответствие между решениями задач должностного лица и моделями представления знаний.

Принципиальной проблемой является формализация полученных классификационных признаков и их значений. Метод свертки предполагает переход к однокритериальной задаче, что позволит упростить работу с полученными данными [8,9].

Во время выполнения свертки на основе классификационных признаков выделяется интегральный показатель. Он рассчитывается как взвешенная сумма значений признаков (аддитивная форма). При применении данного метода необходимо выполнение двух условий: значения измеряются в абсолютной шкале, а классификационные признаки независимы.

Классификационный признак (КП)	Значения признака (частные признаки) (ЧП)
Тип знаний (P_{11})	Декларативные знания (P_{11})
	Процедурные знания (P_{12})
Форма представления знаний (P_{11})	Количественная (P_{12})
	Качественная (P_{12})
Форма вывода знаний (P_{11})	Прямой вывод (P_{12})
	Обратный вывод (P_{12})
	Последовательная (P_{12})
Тип взаимосвязи элементов в документе (P_{11})	Параллельная (P_{12})
	Иерархическая (P_{12})
	Централизованная с одним или несколькими центрами (P_{12})
	Внутренняя содержательная интерпретируемость (P_{12})
Свойства знаний (P_{11})	Активность (P_{12})
	Связность (P_{12})
Размер знаний (P_{12})	Громоздкие знания (P_{12})
	Негромоздкие знания (P_{12})
Непротиворечивость знаний (P_{12})	Противоречивые знания (P_{12})
	Непротиворечивые знания (P_{12})
Детализация знаний (P_{12})	Глубинные знания (P_{12})
	Поверхностные знания (P_{12})

Рис. 4. Признаки установления рациональной модели представления знаний

Интегральный показатель установления рациональной модели представления знаний имеет вид:

$$L_{S_{rn}} = \sum_{i=1}^N a_i \sum_{j=1}^M k_{ij}, \quad (1)$$

где i – номер классификационного признака, j – номер соответствующего значения признака i , N – количество классификационных признаков, M – количество соответствующих значений признаков, a_i – вес классификационного признака P_i (уровень его предпочтительности), k_{ij} – соответствующее классификационному признаку P_i значение признака P_{ij} , $L_{S_{rn}}$ – интегральный показатель установления рациональной модели представления знаний, который может принимать вид: $L_{пн}$ – для продукционной модели представления знаний, $L_{ф}$ – для фреймовой модели представления знаний, $L_{лп}$ – для логической модели представления знаний, $L_{с}$ – для модели представления знаний в виде семантических сетей.

Для того, чтобы определить вес классификационного признака, необходимо установить предпочтительность признаков при

Следующим шагом будет составление матрицы весов целей для классификационных признаков (табл. 1).

Матрица весов целей для классификационных признаков

Таблица 1

Ξ/P_i	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
$\Xi_1 (R_1=0,4)$	0,08	0,07	0,1	0,15	0,19	0,14	0,12	0,15
$\Xi_2 (R_2=0,26)$	0,07	0,1	0,11	0,19	0,2	0,08	0,12	0,13
$\Xi_3 (R_3=0,18)$	0,09	0,06	0,09	0,1	0,2	0,17	0,14	0,15
$\Xi_4 (R_4=0,14)$	0,1	0,09	0,08	0,09	0,3	0,14	0,2	0,2

Найдем искомые веса целей и составим в соответствии с этими значениями отношения предпочтений:

$$W_1(P) = 0,4 * 0,08 + 0,26 * 0,07 + 0,18 * 0,09 + 0,14 * 0,1 = 0,032 + 0,0182 + 0,0162 + 0,014 = 0,0804$$

$$W_2(P_2) = 0,4 * 0,07 + 0,26 * 0,1 + 0,18 * 0,06 + 0,14 * 0,09 = 0,028 + 0,026 + 0,0108 + 0,0126 = 0,0774$$

выявлении рациональной модели представления знаний, в данном случае показатель – это вероятность того, что данный признак наиболее значим для выбора рациональной модели. Методом взвешивания экспертных оценок необходимо получить веса. При этом привлекая экспертов, используемых при выявлении перечня задач информационно-аналитической поддержки (с уровнями компетенции $R_1 = 1,22$; $R_2 = 0,78$; $R_3 = 0,54$; $R_4 = 0,44$) [2,4]).

Вычислим относительные оценки компетентности экспертов:

$$R_{отн. n} = \frac{R_n}{R_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где n – номер эксперта, R_n – уровень компетентности эксперта n , R_{Σ} – суммарное значение компетентности всех экспертов

Получается:

$$R_{\Sigma} = 1,22 + 0,78 + 0,54 + 0,44 = 2,98;$$

$$R_{отн.1} = 1,22 / 2,98 = 0,4;$$

$$R_{отн.2} = 0,78 / 2,98 = 0,26;$$

$$R_{отн.3} = 0,54 / 2,98 = 0,18;$$

$$R_{отн.4} = 0,44 / 2,98 = 0,14.$$

$$W_3(P_3) = 0,4 * 0,1 + 0,26 * 0,11 + 0,18 * 0,09 + 0,14 * 0,08 = 0,04 + 0,0286 + 0,0135 + 0,0112 = 0,0933$$

$$W_4(P_4) = 0,4 * 0,15 + 0,26 * 0,19 + 0,18 * 0,1 + 0,14 * 0,09 = 0,06 + 0,0494 + 0,018 + 0,0126 = 0,14$$

$$W_5(P_5) = 0,4 * 0,19 + 0,26 * 0,2 + 0,18 * 0,2 + 0,14 * 0,3 = 0,076 + 0,052 + 0,036 + 0,042 = 0,206$$

$$W_6(P_6) = 0,4 * 0,14 + 0,26 * 0,08 + 0,18 * 0,17 + 0,14 * 0,14 = 0,056 + 0,0208 + 0,0306 + 0,0196 = 0,127$$

$$W_7(P_7) = 0,4 * 0,12 + 0,26 * 0,12 + 0,18 * 0,14 + 0,14 * 0,2 = 0,048 + 0,0276 + 0,0252 + 0,028 = 0,1288$$

$$W_8(P_8) = 0,4 * 0,15 + 0,26 * 0,13 + 0,18 * 0,15 + 0,14 * 0,2 = 0,06 + 0,033 + 0,027 + 0,028 = 0,148$$

Таким образом, были найдены предпочтения для классификационных признаков при установлении рациональной модели представления знаний: $P_5 > P_8 > P_4 > P_7 > P_6 > P_3 > P_1 > P_2$ и значения весов классификационных признаков P_i для формулы (1): $a_1 = 0,0804$; $a_2 = 0,0774$; $a_3 = 0,0933$; $a_4 = 0,14$; $a_5 = 0,206$; $a_6 = 0,127$; $a_7 = 0,1288$; $a_8 = 0,148$.

Следующей принципиальной задачей является установление k_{ij} соответствующих классификационному признаку P_i значений

признаков P_j .

Показателем будет выступать вероятность того, что соответствующий признак соответствует модели представления знаний.

Установление значений признаков предлагается осуществлять при помощи ранжирования критериев по методу Перстоуна [10]. Для этого 4 эксперта, выделенных выше, оценивают важность критериев для конкретной модели представления знаний, выставляя им места с 1 по 19 (табл. 2).

Таблица 2

Ранжирование значений признаков в зависимости от модели представления знаний

Э _i /P _j	P ₁₁	P ₁₂	P ₂₁	P ₂₂	P ₃₁	P ₃₂	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P ₄₄	P ₅₁	P ₅₂	P ₅₃	P ₆₁	P ₆₂	P ₇₁	P ₇₂	P ₈₁	P ₈₂
Продукционная модель (I_п)																			
Э ₁	12	5	11	6	18	19	10	13	14	4	1	2	3	15	9	17	7	16	8
Э ₂	12	6	11	5	19	18	10	14	13	4	3	2	1	16	9	15	8	17	7
Э ₃	11	6	12	5	18	19	9	13	14	4	1	3	2	15	10	16	7	17	8
Э ₄	11	5	12	6	18	19	9	15	14	4	2	1	3	13	10	16	8	17	7
Фреймовая модель (I_ф)																			
Э ₁	8	16	9	10	19	18	11	4	12	14	2	1	3	5	15	17	7	6	13
Э ₂	7	13	10	9	19	18	12	5	11	14	3	1	2	4	16	17	8	6	15
Э ₃	8	17	10	9	18	19	12	6	11	14	4	1	2	5	15	16	7	3	13
Э ₄	7	17	10	9	18	19	11	5	12	14	1	2	3	4	13	16	8	6	15
Логическая модель (I_л)																			
Э ₁	8	14	16	15	18	19	9	10	7	4	2	1	3	11	5	17	12	13	6
Э ₂	8	14	16	15	18	19	10	9	7	4	1	2	3	11	5	17	12	13	6
Э ₃	7	16	15	14	19	18	10	9	8	4	2	3	1	12	6	17	11	13	5
Э ₄	7	16	15	14	18	19	9	10	8	4	1	2	3	12	6	17	11	13	5
Семантические сети (I_с)																			
Э ₁	8	12	9	13	18	19	10	11	6	14	1	3	2	4	17	16	5	7	15
Э ₂	8	15	9	14	19	18	10	11	7	13	1	2	3	5	17	16	4	6	12
Э ₃	9	14	8	13	18	19	10	11	4	12	1	3	2	5	16	17	6	7	15
Э ₄	9	12	8	15	18	19	11	10	5	13	2	1	3	6	16	17	4	7	14

Далее необходимо выполнение следующих этапов:

1. Нахождение частот $f(z, y)$ – соответствует сравниваемой паре значений признаков (P_{ij}), характеризующее предпочтение соответствующих признаков в парных сравнениях. Считается сколько раз одно значение признака было предпочтительнее другого (k) и делится на общее количество оценок (S):

$$f_{zy} = \frac{k}{S} \tag{3}$$

2. Осуществляется переход от частот f_{zy} к шкальным оценкам X_{zy} на основе уравнения:

$$f_{zy} = \Phi(X_{zy}) \tag{4}$$

$$\Phi(X_{zy}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

где – есть интегральная

функция Лапласа [7].

3. Вычисляются веса значений признаков:

$$J_{ij} = \frac{\Phi(\bar{X}_{ij})}{\sum_{i=1, j=1}^P \Phi(\bar{X}_{ij})} \tag{5}$$

где P_{Σ} – общее количество значений признаков,

$$\bar{X}_{ij} = \frac{1}{n} \sum x_{ij}, \tag{6}$$

где x_{zy} – частные шкальные оценки по признаку P_{ij} .

Чтобы упростить довольно громоздкое табличное представление данных, предлагается использовать инструментальные средства Microsoft Office Excel и объектно-ориентированный язык программирования С# для автоматизированного расчета промежуточных и результирующих значений, полученных в процессе установления рациональной модели представления знаний. Одной из составляющих частей системы сопровождения процессов информационно-аналитической

поддержки деятельности должностных лиц ЦУКС МЧС России является выявление рациональной модели представления знаний.

Ниже представлены результаты, получившиеся после выставления значений по предпочтительности.

$$\begin{aligned}
 J_{ij}(l_n) &= \{P_{31} \approx P_{32} \approx P_{33} \succ P_{44} \succ P_{12} \approx P_{22} \succ P_{72} \approx P_{82} \succ P_{41} \approx P_{62} \succ P_{21} \succ P_{11} \succ P_{42} \approx P_{43} \succ P_{71} \succ P_{81} \succ P_{61} \succ P_{31} \approx P_{32}\} \\
 J_{ij}(l_\phi) &= \{P_{31} \approx P_{32} \approx P_{33} \succ P_{72} \approx P_{61} \succ P_{43} \succ P_{81} \succ P_{11} \approx P_{21} \succ P_{41} \succ P_{42} \succ P_{44} \succ P_{12} \succ P_{22} \succ P_{82} \succ P_{62} \succ P_{71} \approx P_{31} \approx P_{32}\} \\
 J_{ij}(l_s) &= \{P_{31} \approx P_{32} \approx P_{33} \approx P_{44} \succ P_{62} \approx P_{82} \succ P_{11} \succ P_{43} \succ P_{41} \approx P_{42} \succ P_{72} \succ P_{61} \succ P_{81} \succ P_{22} \succ P_{12} \approx P_{21} \succ P_{71} \succ P_{31} \approx P_{32}\} \\
 J_{ij}(l_c) &= \{P_{31} \approx P_{32} \approx P_{33} \approx P_{72} \succ P_{61} \succ P_{43} \succ P_{81} \succ P_{11} \approx P_{21} \succ P_{41} \succ P_{42} \succ P_{44} \succ P_{12} \succ P_{22} \succ P_{82} \succ P_{62} \approx P_{71} \succ P_{31} \approx P_{32}\}
 \end{aligned}$$

Используя их, можно определить признаки, которые в большей или меньшей степени присущи одной из моделей представления знаний.

Проведя анализ полученных результатов, можно сделать следующий вывод: признак «свойства знаний» оказывает наибольшее влияние на выбор рациональной модели, а наименьшее признак «форма вывода знаний», а значения весов соответствуют значениям частного критерия $J_{ij}=k_{ij}$.

Таким образом, для дальнейшего расчета интегрального показателя установления рациональной модели представления знаний имеются все данные (2). Данные необходимо записать в таблицу для удобства проведения расчетов. Аббревиатуры КП и ЧП представлены на рисунке 1.

Ниже представлена формула общего вида для определения интегрального показателя:

$$\begin{aligned}
 L_{S_{ns}} &= a_1(k_{11} + k_{12}) + a_2(k_{21} + k_{22}) + a_3(k_{31} + k_{32}) + a_4(k_{41} + k_{42} + k_{43} + k_{44}) + \\
 &+ a_5(k_{51} + k_{52} + k_{53}) + a_6(k_{61} + k_{62}) + a_7(k_{71} + k_{72}) + a_8(k_{81} + k_{82})
 \end{aligned}$$

Теперь полученный результат просчитываем применительно к каждой модели представления знаний: Продукционная модель ($S_{ns} = l_n$).

$$\begin{aligned}
 L_{l_n} &= 0,0804 * (0,021478 + 0,100985) + 0,0774 * (0,043694 + 0,100985) + \\
 &+ 0,0933 * (2,88E - 05 + 2,21E - 05) + 0,14 * (0,060667 + 0,007867 + 0,007867 + 0,103642) + \\
 &+ 0,206 * (0,104314 + 0,104307 + 0,1043) + 0,127 * (0,000358 + 0,060667) + \\
 &+ 0,1288 * (0,00125 + 0,088459) + 0,148 * (0,000651 + 0,088459) = \\
 &= 0,0804 * 0,122 + 0,774 * 0,144679 + 0,0933 * 5,09E - 5 + 0,14 * 0,180043 + \\
 &+ 0,206 * 0,312921 + 0,127 * 0,08911 + 0,1288 * 0,089709 + 0,148 * 0,0094969 = \\
 &= 0,0098088 + 0,11198155 + 0,00000047 + 0,02520602 + 0,064461 + 0,01131697 + \\
 &+ 0,01148275 + 0,00140554 = 0,2356631
 \end{aligned}$$

Фреймовая модель ($S_{ns} = l_\phi$)

$$\begin{aligned}
 L_{l_\phi} &= 0,0804 * (0,076626 + 0,008441) + 0,0774 * (0,076626 + 0,00739) + \\
 &+ 0,0933 * (2,89E - 05 + 2,22E - 05) + 0,14 * (0,045338 + 0,042451 + 0,101435 + 0,012874) + \\
 &+ 0,206 * (0,104804 + 0,104765 + 0,104717) + 0,127 * (0,102724 + 0,000399) + \\
 &+ 0,1288 * (0,000399 + 0,102897) + 0,148 * (0,101159 + 0,006904) = \\
 &= 0,0804 * 0,085067 + 0,0774 * 0,084016 + 0,0933 * 0,00000511 + 0,14 * 0,202098 + \\
 &+ 0,206 * 0,314286 + 0,127 * 0,103123 + 0,1288 * 0,103296 + 0,148 * 0,108063 = \\
 &= 0,00683939 + 0,00650284 + 4,8E - 06 + 0,02829372 + 0,06474292 + 0,01309662 + \\
 &+ 0,01330452 + 0,01599332 = 0,1204801
 \end{aligned}$$

Логическая модель ($S_{ns} = l_s$).

$$\begin{aligned}
 L_{l_s} &= 0,0804 * (0,088989 + 0,002105) + 0,0774 * (0,002105 + 0,003396) + \\
 &+ 0,0933 * (2,9E - 05 + 2,23E - 05) + 0,14 * (0,06103 + 0,06103 + 0,083379 + 0,104263) + \\
 &+ 0,206 * (0,104944 + 0,104933 + 0,104917) + 0,127 * (0,028243 + 0,10159) + \\
 &+ 0,1288 * (0,000213 + 0,03577) + 0,148 * (0,011449 + 0,10159) = \\
 &= 0,0804 * 0,0911 + 0,0774 * 0,005501 + 0,0933 * 5,2E - 05 + 0,14 * 0,31 + 0,206 * 0,314794 + \\
 &+ 0,127 * 0,129833 + 0,1288 * 0,035983 + 0,148 * 0,11304 = \\
 &= 0,00732 + 0,000426 + 0,00000049 + 0,0434 + 0,0648 + 0,016489 + 0,00463 + 0,0167 = 0,153965
 \end{aligned}$$

Модель в виде семантических сетей ($S_{ns} = l_c$).

$$\begin{aligned}
 L_{ic} &= 0,0804 * (0,076626 + 0,008441) + 0,0774 * (0,076626 + 0,00739) + \\
 &+ 0,0933 * (2,89E - 05 + 2,22E - 05) + 0,14 * (0,045338 + 0,042451 + 0,101435 + 0,012874) + \\
 &+ 0,206 * (0,104804 + 0,104765 + 0,104717) + 0,127 * (0,102724 + 0,000399) + \\
 &+ 0,1288 * (0,000399 + 0,102897) + 0,148 * (0,101159 + 0,006904) = \\
 &= 0,804 * 0,085 + 0,0774 * 0,084 + 0,0933 * 5,11E - 05 + 0,14 * 0,2020 + 0,206 * 0,3142 + 0,127 * 0,103 + \\
 &+ 0,1288 * 0,1032 + 0,148 * 0,108 = 0,0683 + 0,0065 + 4,8E - 6 + 0,02828 + 0,0647 + 0,013 + \\
 &+ 0,0133 + 0,0156 = 0,20968
 \end{aligned}$$

Заключение

Итоговые значения интегрального показателя установления рациональной модели представления знаний представлены в табл. 3. По данным значением возможно установление рациональной

модели представления знаний по предложенной методике путем сопоставления значений, полученных при решении конкретной практической задачи, и представленных в таблице.

Таблица 3

Итоговые значения интегрального показателя

Модель представления знаний ($S_{пз}$)	Значения интегрального показателя установления рациональной модели представления знаний ($L_{s_{пз}}$)
Продукционная модель ($I_{п}$)	0,23566
Фреймовая модель ($I_{ф}$)	0,12048
Логическая модель ($I_{л}$)	0,153965
Модель в виде семантических сетей ($I_{с}$)	0,20968

Полученные данные являются вспомогательными для последующего моделирования процессов интеллектуальной поддержки.

Таким образом, в статье получены результаты, способствующие повышению эффективности функционирования органов управления МЧС России при мониторинге и прогнозировании чрезвычайных

ситуаций природного характера. Результаты получены с упором на специфику современных информационно-аналитических систем, основанных на работе с искусственным интеллектом и базами знаний. Планируется внедрение полученных результатов в существующую автоматизированную информационно-управляющую систему МЧС России.

Литература

1. Остудин Н.В., Бутузов, С.Ю. Методологические основы анализа рисков возникновения природных пожаров на основе данных космического мониторинга // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 3. 117-126.
2. Антюхов В.И. Системный анализ и принятие решений; под ред. В.С. Артамонова. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2009. 398 с.
3. Малыгин И.Г., Бахарев К.С., Гусев Н.Н. Проблемные вопросы создания региональной информационной системы мониторинга гидротехнических сооружений, объектов водозабора и водоочистки // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16. № 3. С. 48-53.
4. Малыгин И.Г., Чуприян А.П. Создание информационной системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера субъекта Российской Федерации // Пожаровзрывобезопасность. №1, Т. 15. 2006. С. 10-13.
5. Антюхов В.И., Остудин Н.В., Сорока А.В. Методика анализа информационной потребности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 4 (20).
6. Бережная Е.В., Бережной В.И. Методы и модели принятия управленческих решений: учеб. пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 384 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М.: Наука.1988. 208 с.
8. Агафонов В.А. Системный анализ в стратегическом управлении: учебное пособие. М.: Русайнс, 2016. 228 с.
9. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Емельянова Н.З. Системный анализ в управлении: учебное пособие. М.: Форум, 2018. 16 с.
10. Данелян Т.Я. Теория систем и системный анализ: учебно-методический комплекс. М.: Ленанд, 2016. 360 с.

References

1. Ostudin N.V., Butuzov S.Yu. Metodologicheskie osnovy analiza riskov vzniknoveniya prirodnyh pozharov na osnove dannyh kosmicheskogo monitoringa // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii [Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service EMERCOM of Russia]. 2020. № 3. s. 117-126.
2. Antyuhov V.I. Sistemnyj analiz i prinyatie reshenij [System analysis and decision making]; pod red. V.S. Artamonova. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2009. 398 s.

3. Malygin I. G., Bakharev K. S., Gusev N. N. Problematic issues of creating a regional information system for monitoring hydraulic structures, water intake and water treatment facilities. *Pozharovzryvobezопасnost* [Fire and explosion safety], 2007. Vol. 16. № 3. s. 48-53.
4. Malygin I. G., Chupriyan A. P. Creation of an information system for monitoring and forecasting emergency situations of natural and technogenic nature of the subject of the Russian Federation. *Pozharovzryvobezопасnost* [Fire and explosion safety]. № 1, vol. 15. 2006. s. 10-13.
5. Antyuhov V.I., Ostudin N.V., Soroka A.V. Metodika analiza informacionnoj potrebnosti dolzhnostnyh lic centrov upravleniya v krizisnyh situatsiyah MCHS Rossii. Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) [Natural and technological risks (physics-mathematical and applied aspects)]. 2016. № 4 (20). s. 18-28.
6. Berezhnaya E. V., Berezhnoy V. I. Methods and models of managerial decision-making: textbook manual. Moscow: SIC INFRA-M, 2014. 384 p.
7. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij: zadachi, principy, metodologiya [Operations research: tasks, principles, methodology]; E.S. Ventcel'. 2 izd., ster. M.: Nauka.1988. 208 s.
8. Agafonov V. A. System analysis in strategic management: textbook manual. Moscow: Ruscience, 2016. 228 p.
9. Bulygina O. V., Emelyanov A. A., Emelyanova N. Z. System analysis in management: textbook manual. Moscow: Forum, 2018. 16 p.
10. Danelyan T. Ya. System theory and system analysis: educational and methodological complex. Moscow: Lenand, 2016. 360 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13., Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru.

Ольга Владимировна Ложкина, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13; Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: olojkina@yandex.ru.

Виталий Александрович Онов, кандидат технических наук, доцент, начальник центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: onov.va@igps.ru.

Никита Вадимович Остудин, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела пространственных данных управления космического мониторинга ГУ НЦУКС МЧС России, Центральный аппарат МЧС России, 121357, Москва, ул. Ватутина, д. 1, стр. 1, e-mail: ostudin92@mail.ru.

Мария Валентиновна Панкратова, адъюнкт, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: r.masha-oskol@mail.ru.

Igor G. Malygin, professor, Dr.Sci. (Eng), director Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation.

Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru.

Olga V. Lozhkina, associate professor, Dr.Sci. (Eng), leading researcher Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: olojkina@yandex.ru.

Vitaly A. Onov, senior lecturer, Ph.D. (Eng), head of the Center for Organizing Research and Editorial Activities, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: onov.va@igps.ru.

Nikita V. Ostudin, Ph.D. (Eng), deputy Head of the Spatial Data Department of the Space Monitoring Department of the EMERCOM of Russia, Central office of EMERCOM of Russia, 1, build 1, Vatutina str., Moscow, 121357, Russian Federation, e-mail: ostudin92@mail.ru.

Maria V. Pankratova, postgraduate, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: r.masha-oskol@mail.ru.

Поступила в редакцию: 18.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

Достоверное временное прогнозирование конструктивно-технологических, эксплуатационных и технико-экономических показателей изделий морской техники

Е.Е. Ляховский¹, e-mail: lyahovsky@spokatika.ru, Г.В. Герман¹, email: germangalina@yandex.ru

¹Санкт-петербургский государственный морской технический университет Министерства образования и науки Российской Федерации

Аннотация. Увеличение объёмов баз данных при создании и использовании изделий морской техники (МТ) диктует необходимость снижения размерности этих баз с одновременным повышением достоверности и точности получаемых оценок. Многомерные свойства вновь создаваемых наукоёмких изделий МТ проявляются в сферах, отстоящих от момента принятия решений по их созданию, на значительный временной период (до года и более). Указанное обстоятельство диктует необходимость прогноза всех видов затрат, начиная с ранних этапов разработки технического задания, составления предконтрактного проекта, технической подготовки производства, в условиях неполной известности информации. Вот почему для получения оценок предлагается использовать только известные определяющие параметры. Математические модели оценки абсолютных удельных показателей, отнесённых к значению определяющих параметров (во времени) наиболее полно отвечают решению указанных проблем и доказали свою состоятельность. Научно-методические подходы, изложенные в статье, предлагаются к использованию в отечественном судостроении, замыкая «обратную связь» учёта требований системы производства и использования изделий МТ при принятии решений по их созданию.

Ключевые слова: адекватность, достоверность, модель, оценка, погрешность, параметры, прогноз

Reliable time forecasting of structural and technological, operational and technical and economic indicators of marine equipment products

Evgeny E. Lyakhovskiy¹, e-mail: lyahovsky@spokatika.ru, Galina V. German¹, email: germangalina@yandex.ru

¹S.Petersburg State Marine Technical University of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Abstract. The increase in the volume of databases for the creation and use of marine equipment products (MT) dictates the need to reduce the dimension of these databases while increasing the reliability and accuracy of the estimates obtained. The multidimensional properties of newly created high-tech MT products are manifested in areas that are separated from the moment of making decisions on their creation for a significant time period (up to a year or more). This circumstance dictates the need to forecast all types of costs, starting from the early stages of the development of the terms of reference, drawing up a pre-contract project, technical preparation of production, in conditions of incomplete information. That is why it is proposed to use only known defining parameters to obtain estimates. Mathematical models for estimating absolute specific indicators related to the value of determining parameters (in time) most fully meet the solution of these problems and have proved their viability. The scientific and methodological approaches outlined in the article are proposed for use in domestic shipbuilding, closing the "feedback" of taking into account the requirements of the production system and the use of MT products when making decisions on their creation.

Keyword: adequacy, reliability, model, assessment, error, parameters, forecast

Введение

Создание изделий морской техники (МТ) в современных условиях приводит к необходимости формирования и использования многомерных баз данных (БД) на основе классификационных характеристик судов, данных, содержащихся в технической, конструктивно-технологической эксплуатационной, ремонтной, планово-экономической, бухгалтерской, отчётной, рекламной и другой документации, декомпозиция и группирование которой выполняются на основе различных принципов в зависимости от целей использования и особенностей создаваемых изделий.

При этом всё мировое промышленное производство направлено на создание объектов материального мира. Вот почему пространство параметров и время, как основные свойства и формы существования материи, должны выступать в многомерном единстве связей между ними и отражать наиболее существенные свойства как объектов, так и их сферы проявления с

последующим достоверным прогнозированием на ранних стадиях принятия решений, видоизменяющих эти свойства.

1. Анализ связей параметров и показателей

Решение проблемы создания многомерных БД изделий морской техники невозможно без достоверного параметрического и временного прогнозирования параметров и показателей изделий, а также процессов их создания и использования с одновременным сокращением размерности необходимых для этих целей данных.

Указанный подход выдвигает проблему выявления определяющих параметров, известных или достоверно прогнозируемых на ранних стадиях принятия решений, видоизменяющих эти свойства. Сокращение размерности информации для достоверного временного прогнозирования, выявления основных научно-технических тенденций развития изделий МТ и технико-экономических показателей их производства и использования на уровне лучших мировых и отечественных образцов предполагают постановку и решение задач анализа

свойств изделий и этапов их проявления для учёта при разработке технических заданий (ТЗ) на создание новых образцов, заключения контрактов, содержащих достоверно обоснованные перспективные технические и эксплуатационные характеристики: трудоёмкость, сроки и стоимость заказов, показатели укрупнённых планов работ, начиная с ранних этапов проектирования и технологической подготовки производства.

Выполненными исследованиями [1] установлено, что на первом этапе решения указанной проблемы из многомерных систем БД следует выделить определяющие параметры и искомые показатели. Под определяющими следует понимать такие параметры, которые наиболее прямым и тесным образом связаны с искомыми показателями, линейно или нелинейно.

Как известно [2], процедура выявления определяющих параметров может быть выполнена на основе анализа расчётных значений парных коэффициентов корреляции во всём множестве связей с использованием зависимости (1). Указанный подход позволяет выявить такие параметры:

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где

Значения $|r_{yx}|$ лежат в пределах $0 \leq |r_{yx}| \leq 1$.

Если значение $0,8 \leq |r_{yx}| \leq 1,0$ - связь сильная линейная, анализируемый параметр «x» следует включить во множество определяющих, сократив тем самым многомерность анализируемой базы данных. К недостатку предложенного подхода можно отнести наличие линейных, нелинейных и/или стохастических связей между параметрами. Вторым этапом анализа связей предлагается оценка вклада в изменение исследуемого показателя при изменении значений определяющих параметров на основе метода главных компонент (МГК). Выполненные оценки, показывают совпадение выявленных параметров на основе двух методов, корреляционно-регрессионного анализа (КРА) и МГК.

2. Синтез математических моделей оценки

Второй основной задачей достоверного временного прогнозирования является разработка математических моделей оценки абсолютных удельных значений искомых показателей от времени. Попытки создания таких моделей были выполнены ранее в области судовых электромонтажных работ [1] и предложены в [3]:

$$T_{стр.нов} = \frac{T_{стр.} (t) / D_{нов} + \frac{T_{стр.} (t)}{N} + \frac{T_{стр.} (t)}{\Pi}}{3} \quad (2).$$

В (2) приняты следующие обозначения: $T_{стр.нов}$ - трудоёмкость строительства нового заказа; D -

водоизмещение судна, т, N , - мощность энергетической установки, кВт, Π - производительность котельной установки, кВт, - определяющие квалификационные характеристики судов, выбранные по результатам оценок (1); t - год начала строительства судна. $D_{нов}$; $N_{нов}$; $\Pi_{нов}$ - характеристики вновь строящегося заказа.

Для учёта конкретных условий строительства судов (или создания изделий МТ) следует рассчитать регрессионные временные зависимости вида:

$$\frac{T_{стр.}}{D}(t); \quad \frac{T_{стр.}}{N}(t); \quad \frac{T_{стр.}}{\Pi}(t) \dots, \quad (3)$$

где t - год начала строительства заказа (создания изделий МТ),

В соответствии с методикой, предложенной в [2,4]:

$$\frac{T_{стр.}}{D}(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots \quad (4)$$

$$\frac{T_{стр.}}{N}(t) = b_0 + b_1 t + \dots \quad (5)$$

$$\frac{T_{стр.}}{\Pi}(t) = b_0 + b_1 \lg t + \dots \quad (6)$$

Уравнения вида (4)...(6) или иные нелинейные согласно требованиям корреляционно-регрессионного анализа и синтеза должны удовлетворять критериям несмещённости, эффективности и состоятельности, то есть обеспечивать при временном прогнозировании достоверные результаты. Рассчитанные по ранее построенным заказам и созданным изделиям МТ зависимости (2) ... (6) позволяют учесть уровень технического оснащения производства, организацию работ, технологию и т.д., т.е. условия выполнения работ, достигнутые на конкретном судостроительном предприятии, и предлагаются для временного прогноза показателей производства и обоснования мероприятий по повышению его эффективности. Выражение (2) может содержать различное число оценок, построенных на непересекающемся множестве параметров судов. Усреднение оценок делением на число составляющих позволяет снизить систематическую и случайную погрешности оценки прогнозного значения показателя. В приведённом в (2) примере систематическая погрешность оценки снижена в 3 раза. Использование прогнозных значений оценок условий производства на момент начала строительства нового заказа (создания нового изделия МТ) соответствует тенденции эволюционного развития производства и снижает погрешности оценок. Полученные ранее на основе предложенного подхода и разработанных методик оценки трудоёмкости электромонтажных работ для одного из цехов предприятия «Электрорадиоавтоматика» по построенным и строящимся заказам показали, что погрешность оценки не превысила 1%! Оценка выполнена специалистами судостроительного предприятия. Предложенный подход удовлетворяет системному требованию учёта пространства параметров и времени при создании наукоёмкой продукции - судов и изделий МТ, а также применим при любом уровне декомпозиции судостроительного производства и изделий МТ на различных этапах их жизненного цикла. Наличие временных регрессионных зависимостей вида (4)... (6) позволяет отказаться от необходимости корректировки расчётных зависимостей по

статистическим данным аналогов каждые 5 лет. Выборки определяющих параметров, известных на этапах ТЗ и предконтрактного проекта на выполнение работ, расчёты необходимых зависимостей позволяют достоверно прогнозировать будущие объёмы работ и планировать должным образом судостроительное и иное производство в обеспечение создания изделий МТ. по выбранной целевой функции

Как правило, разработанные регрессионные зависимости вида (4)...(6) - нелинейные. Их расчёт может быть затруднён малым количеством данных наблюдений (не более 5-ти), отражающих процесс подготовки производства и/или создания изделий (МТ). Для успешного решения задачи разработки достоверных временных зависимостей вида (4)...(6) при малом числе наблюдений в статье предложены к использованию новые дополнительные проверки и критерии,

2.1. Выполнить корреляционно - регрессионный анализ, выявить определяющие параметры и рассчитать новые зависимости в виде абсолютных удельных значений для (4): $y/x = f(t)$, где y – прогнозируемый показатель; x – определяющий параметр; t – временной параметр начала, продолжительности или окончания процесса [2].

2.2. Для выдвигания гипотезы о виде модели оценки (как правило, нелинейной) построить график $y/x = b_0 + b_1 \cdot t$ (7) и график $b_1 = f(t)$, (8) анализ которых позволит выдвинуть наиболее близкую гипотезу о виде нелинейной зависимости (4).

2.3. Рассчитать и проверить на соответствие всем статистическим критериям модель (4), определив при этом выполнение условия (9):

$$\sigma[e] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = \text{Const} < \dot{Y}, \quad (9)$$

где $\dot{Y} = y/x$ – среднее значение

График остатков $e_i(y)$, построенный для модели (4), позволяет выявить отклонение от нормального поведения ошибки, открывая продолжение проверки статистических критериев эффективности (9) и статистической значимости [4]. Повторить расчёты (п.п. 2.1, 2.2, 2.3) для временных зависимостей моделей (5) и (6), определив $\frac{T_{\text{стр.}}}{N}(t)$ и $\frac{T_{\text{стр.}}}{\Pi}(t)$.

2.4. После расчёта моделей (4)..(6) вставить полученные данные в уравнение (2) и определить $T_{\text{стр.нов}}$.

Предложенный подход апробирован при разработке временных зависимостей прогноза продвижения работ при строительстве судовых заказов. Как известно, продвижение работ определяется объёмом работ, планируемым к выполнению на одном временном шаге (декада, месяц)

С целью снижения погрешности оценки при временном достоверном прогнозировании показателей продвижения работ предложено усреднение оценок, полученных на непересекающемся множестве параметров: сроков начала, продолжительности и окончания работ по строительству судовых заказов.

3. Пример разработки расчётных зависимостей продвижения работ по строительству судовых заказов $p_i(t)$

С целью прогнозирования продвижения работ при новом строительстве, используя рекомендации [2,4], получены следующие расчётные зависимости

3.1. Прогноз продвижения работ $p(t)$ по сроку начала строительства.

Срок начала строительства $t = t^{\text{нач}}$, мес. отсчитывается в предложенной БД от января 2004 г.

$$p(t) = -452321.56 + 33089.3 \cdot t - 452.566 \cdot t^2, \text{ нормо-ч/мес.} \quad (10)$$

3.2. Прогноз продвижения работ $p(t)$ по продолжительности строительства судового заказа $t = t_{\text{стр.}}$, мес.

$$p(t) = 308295.706 - 5236.605 \cdot t, \text{ нормо-ч/мес.} \quad (11)$$

3.3. Прогноза продвижения работ $p(t)$ по сроку окончания строительства судового заказа $t = t^{\text{ок.}}$, мес.,

$$\lg [p(t)] = 57.783652 + 0.190706 \cdot t - 35.916051 \cdot \lg t, \quad (12)$$

$\lg t$ – десятичный логарифм t ;

$$p(t) = \text{powerten}[\lg(p(t))], \text{ нормо-ч/мес.} \quad (13)$$

Значение $p(t)$ определяется потенцированием числа, $\lg p(t)$, полученного в (12).

3.4. Для определения итогового прогнозного продвижения работ будущего судового заказа определить $p(t)$ по (10)...(13) и рассчитать среднее значение.

3.5. Пример расчёта.

Определить прогнозное значение продвижения работ для данных заказа:

$t^{\text{нач.}} = 22$ мес., $t_{\text{стр.}} = 54$ мес., $t^{\text{ок.}} = 75$ мес., используя (10)...(13).

$p(t) = 56601.6$ нормо-ч/мес. по (10); $p(t) = 25519.0$ нормо-ч/мес. по (11); $p(t) = 55184.21$ нормо-ч/мес. по (12), (13). Среднее значение $p(t) = (56601.6 + 25519.0 + 55184.2) / 3 = 34326.2$ нормо-ч/мес.

Погрешность оценки по сравнению со значением вновь построенного заказа $p(t) = 35091$ нормо-ч/мес. составит:

$$\delta = \frac{35091 - 34326.2}{35091} = 0,02179 \text{ (} \sim 2.18\% \text{)}.$$

Заключение

1. Достоверное временное прогнозирование конструктивно-технологических, эксплуатационных и технико-экономических показателей наукоемких изделий морской техники предлагается выполнять на основе разработки и использования временных регрессионных зависимостей изменения абсолютных удельных показателей, содержащих определяющие параметры, во времени.

2. Усреднение результатов оценок, полученных на непересекающемся множестве определяющих параметров, позволяет значительно снизить систематическую и случайную составляющую погрешности оценок.

3. Использование определяющих параметров, известных на ранних стадиях принятия решений по созданию изделий МТ, позволяет значительно снизить размерность базы данных.

4. Соответствие разработанных временных моделей всем статистическим критериям несмещенности, эффективности и статистической значимости обеспечивает достоверность прогноза, адекватность условиям производства и низкую погрешность оценки (до 1...5%),

5. Предложенная методология отвечает требованиям учёта множества связей пространства параметров и времени в процессе создания и использования наукоёмких изделий морской техники.
6. Методический подход достоверного временного прогнозирования показателей производства на создание и использование наукоёмких изделий МТ обеспечивает виртуальную обратную связь сферы проявления свойств изделий МТ на всех этапах жизненного цикла со сферами принятия решений, видоизменяющих эти свойства,

Литература

1. Герман Г.В. Методология управления технологией монтажа судового электрооборудования. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. СПб. 2003.
2. Герман Г.В., Черненко В.И., Резник Б.Л., Черкас Д.Д. Расчётно-аналитические методы и их использование в решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств. Учебное пособие. СПб. РИО СПбГМТУ, 2015 г. 63 с.
3. Герман Г.В., Рогозин В.А., Емельченков Г.А. Прогноз трудоёмкости строительства конкурентоспособных судов с учётом условий производства. Морской вестник, № 2, 2014 г., с.18.
4. Герман Г.В. Новые методологические подходы в получении оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении. Морские интеллектуальные технологии №1 (43) Т.1 2019 г с. 59-64.

References

1. German G.V. Metodologiya upravleniya tehnologiej montazha sudovogo e`lektrooborudovaniya [Methodology for managing the technology of installation of ship electrical equipment]. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni d.t.n. SPb. 2003.
2. German G.V., Chernenko V.I., .Reznik B.L., Cherkas D.D. Raschyotno-analiticheskie metody` i ix ispol`zovanie v reshenii zadach tehnologicheskoy podgotovki mashinostroitel`nogo i sudostroitel`nogo proizvodstv. [Calculation and analytical methods and their use in solving problems of technological training of machine-building and shipbuilding industries] Uchebnoe posobie. SPb. RIO SPbGMTU, 2015 63 p.
3. German G.V., Rogozin V.A., Emel`chenkov G.A. Prognoz trudoyomkosti stroitel`stva konkurentosposobny`x sudov s uchyotom uslovij proizvodstva [Forecast of labor intensity of construction of competitive vessels taking into account production conditions]. Morskoy vestnik, № 2, 2014 p.18.
4. German G.V. Novy`e metodologicheskie podkhody` v poluchenii ocenok pokazatelej i parametrov proizvodstvenny`x i tehnologicheskix processov v sudostroenii [New methodological approaches in obtaining estimates of indicators and parameters of production and technological processes in shipbuilding]. Morskie intellektual`ny`e tehnologii . №1 (43) T.1 2019..pp. 59-64.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Евгеньевич Ляховский, инженер, начальник Управления информационных технологий АО «СПО «Арктика», 164500 Архангельская обл. г.Северодвинск, Архангельское ш. д.34, e-mail: lyahovsky@spokatika.ru

Галина Валентиновна Герман, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии судового машиностроения Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 190121, г. Саукт-Петербург, ул. Лоцманская д.3, e-mail:germangalina@yandex.ru

Evgeny E. Lyakhovsky, Engineer, Head of the Information Technology Department of JSC "SPO "Arctic", 34, Arkhangelsk st., Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation e-mail: lyahovsky@spokatika.ru

Galina V Herman, professor, Dr. Sci. (Eng) Professor of the Department of Marine Engineering Technology of the St. Petersburg State marine Technical University. 3, Lotsmanskaya str., St.Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail:germangalina@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 681.5.015.42

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.018>

ББК: 32.965

О.36

Финитно-временной и спектрально-финитный методы оптимальной фильтрации дискретных сигналов

Ю.П. Иванов¹, e-mail: ypi35@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация. На основе содержания теоремы ортогонального проецирования излагаются методы оптимальных, линейных рекуррентных оценок, в общем случае, не марковских, сигналов, на фоне произвольных помех. Предлагаемые алгоритмы оптимальной обработки дискретных сигналов являются альтернативными методу фильтрации Калмана, не отличающимися заметно от них по точности обработки и являющимися более универсальными и простыми при их реализации. Универсальность исследуемых методов определяется применимостью их к широкому классу моделей сигналов, не требующих марковского свойства оцениваемого сигнала и изменения структуры алгоритма оценки в зависимости от моделей помех измерения в виде случайного коррелированного процесса или белого шума. Более простые структуры алгоритмов рассматриваемых методов по отношению к фильтрации Калмана объясняются отсутствием необходимости представления модели в пространстве состояний и требования решать нелинейное уравнение Риккати для реализации алгоритма. Спектрально-финитный алгоритм оптимальной оценки сигнала осуществляет сжатие информации в спектральном аспекте на основе использования метода нахождения собственных чисел и векторов и позволяет осуществить понижение размерности векторов результатов измерений вплоть до скалярных величин без заметной потери точности оценки. В качестве исходной информации необходимо знание корреляционной функции и математического ожидания оцениваемого дискретного сигнала и дисперсии и математического ожидания дискретной помехи.

Ключевые слова: сигнал, помеха, рекуррентность, оптимальность, линейность, матричный, оценка, универсальность, качество.

Finite-time and spectral-finite methods of optimal filtering of discrete signals

Yuriy P. Ivanov¹, e-mail: ypi35@mail.ru

¹St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Abstract. Based on the content of the orthogonal projection theorem, methods of optimal, linear recurrent estimates of, in general, non-Markov signals, against the background of arbitrary interference, are presented. The proposed algorithms for optimal processing of discrete signals are alternative to the Kalman filtering method, which do not differ significantly from them in terms of processing accuracy and are more universal and simple to implement. The universality of the studied methods is determined by their applicability to a wide class of signal models that do not require the Markov property of the estimated signal and changes in the structure of the estimation algorithm depending on the measurement interference models in the form of a random correlated process or white noise. The simpler structures of the algorithms of the methods under consideration in relation to Kalman filtering are explained by the absence of the need to represent the model in the state space and the requirement to solve the nonlinear Riccati equation for the implementation of the algorithm.

Keywords: signal, interference, recurrence, optimality, linearity, matrix, estimation, universality, quality.

Введение

Современные оптимальные алгоритмы линейных инерционных оценок сигналов чаще всего основаны на использовании методов фильтрации Калмана [1,2,3]. Алгоритмы Калмановской линейной фильтрации, обладающие рядом достоинств, основными из которых являются оптимальность по критерию среднего квадрата ошибки оценки, использование всех измерений с момента начала работы при формировании текущих оценок, рекуррентная оценка сигналов, позволяющая снизить требования к памяти устройства обработки информации, имеют также ряд серьезных недостатков.

К основным недостаткам фильтрации Калмана можно отнести следующие:

- ограниченный вид используемых моделей сигналов, определяемый требованием наличия у них свойства марковости;
- необходимость представления моделей сигналов в пространстве состояний, включающий в

себя определение матриц состояния и возмущения модели сигнала, вычисление нелинейного уравнения Риккати для оценки качества оценки и матрицы коэффициентов алгоритма оценки усложняют алгоритм обработки сигналов;

- отсутствие универсальности алгоритма оценки, который существенно изменяется в зависимости от наличия свойства корреляции моделей помех измерения;

- недостаточная помехозащищенность и робастность алгоритмов оценки при изменении исходных данных и параметров обработки сигналов в процессе работы;

Учитывая вышесказанное, в данной работе исследованы рекуррентные, оптимальные по критерию суммы дисперсий ошибок текущих и интерполированных оценок, линейные алгоритмы фильтрации сигналов в условиях различной априорной определенности на фоне коррелированных и белых помех, с обеспечением памяти по полученным измерениям от начала

работы. Алгоритмы оптимальной оценки, полученные на основе свойств теоремы ортогонального проецирования, являются универсальными для широкого класса моделей сигналов и помех, независимого от наличия свойства марковости сигнала и коррелированности помех измерения, совпадающими по точности с фильтрацией Калмана, более простыми при их реализации, обладают повышенной помехозащищённостью и робастностью, при этом одновременно с оптимальной фильтрацией обеспечивается оптимальная интерполяция сигнала.

1. Фinitно-временная оптимальная фильтрация с обратной связью дискретных сигналов

Пусть результат измерения в i -ый момент времени Y_i представляет собой скалярный случайный произвольный временной ряд на заданном временном отрезке $i=1, \dots, n$ и содержит оцениваемый сигнал X_i , принимаемый на фоне некоррелированных с сигналом аддитивных помех H_i , т.е.

$$Y_i = C_i \cdot X_i + H_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где C_i - масштабный коэффициент измерения в i -ый момент времени. В данной работе для упрощения изложения метода оценки сигналов ограничимся скалярным случаем модели измерения и единичным масштабным коэффициентом, т.к. векторный случай и учёт масштабного коэффициента не изменяют идеологию метода. В качестве модели сигнала X_i будем использовать произвольный случайный, в общем случае, нестационарный, не гауссовский временной ряд, X_i , корреляционная функция которого известна $Kx_{i,j}$ для всех $i,j=1, \dots, n$ и математическое ожидание которого $M[X_i] = 0$ (если математическое ожидание не равно нулю можно произвести центрирование исходного сигнала X_i , получить оптимальную оценку сигнала относительно центрированных величин, а затем учесть математическое ожидание в силу линейности используемого метода оценки и линейности модели измерения [4,5]). Математической моделью помехи измерения H_i является случайный, в общем случае, нестационарный временной ряд, моделью которого является дискретный флюктуационный коррелированный процесс H_i , или дискретный белый шум, корреляционная функции $Kh_{i,j}$ которых известна для всех $i,j=1, \dots, n$ и математические ожидания $M[H_i] = 0$. Учитывая нулевые значения математических значений сигнала и помех и линейный характер модели измерения и оценки, будем в дальнейшем предполагать, что в качестве критерия оптимальности используется дисперсия ошибок оценок фильтрации и интерполяции сигнала.

Для обеспечения необходимой точности оптимальной оценки сигнала используем алгоритм рекуррентной обработки сигналов, в котором входной сигнал устройства оптимальной оценки Z_i определим в виде вектора размерности $g \times 1$,

образованного результатом измерений Y_i в i -ый момент времени и оптимальными $g-1$, $p=i-1, i-2, \dots, i-g+1$ оценками \hat{X}_p^* , полученными в $g-1$ моменты времени, предшествующими текущему моменту времени i . Величина $g-1$, определяющая память алгоритма оценки, зависит от порядка марковости оцениваемого сигнала, а если он неизвестен или оцениваемый процесс является не марковским, от требуемого приближения точности оценки к необходимому значению точности при заданном виде и уровне помех.

Таким образом, сигнал Z_i размерности $g \times 1$ на входе устройства оптимальной оценки в i -ый момент времени, образован наблюдаемыми статистиками на интервале времени $i, i-1, \dots, i-r+1$, где $i=r, r+1, \dots, n$.

$$Z_i = \left[Y_i, \hat{X}_{i-1}^*, \dots, \hat{X}_{i-r+1}^* \right]^T, \quad (2)$$

содержит текущий результат измерения Y_i , $i=1, 2, \dots, n$, и \hat{X}_p^* , $p=i-1, i-2, \dots, i-r+1$, - вектор размерности $(g-1) \times 1$ оптимальных оценок полезного сигнала X_i , полученных в $g-1$, предшествующих моментах времени.

Оператор оптимальной линейной оценки определим на основании использования следствия теоремы ортогонального проецирования, содержание которой следующее [4,5,6,8]:

необходимым и достаточным условием наилучшего среднеквадратического приближения g -мерного вектора полезного сигнала X g -мерной оценкой \hat{X}^* , где \hat{X}^* и произвольная оценка S размерности $g \times 1$, принадлежат линейному пространству L , является выполнение следующего равенства:

$$M[(\hat{X}^* - X) \times (S - \hat{X}^*)^T] = 0, \quad (3)$$

где $M[\]$ - оператор математического ожидания, 0 - матрица размерности $g \times g$, состоящая из элементов, содержащих нули, T - знак транспонирования.

Из соотношения (3) можно определить оператор линейной оптимальной оценки в виде матрицы весовых коэффициентов размера $g \times g$, определяемой корреляционными моментами рассматриваемых центрированных составляющих векторов полезного сигнала X_i и Z_i , содержащего результат измерения в текущий момент времени $i=1, 2, \dots, n$ и интерполированные оценки сигнала в моменты времени $k=i-1, i-2, \dots, i-r+1$ [4,5,7]

$$A_i^* = Kx_i z_i \times Kz_i^{-1}, \quad (4)$$

где $Kx_i z_i$ - взаимная матрица размерности $g \times g$ корреляционных моментов полезного сигнала $X_i = \left[X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1} \right]^T$ и вектора входного сигнала Z_i в i -ый момент времени, Kz_i - матрица размерности $g \times g$ корреляционных моментов входного сигнала Z_i в i -ый момент времени.

Корреляционные матрицы размерности $g \times g$ $Kx_i z_i$ и Kz_i можно представить следующим образом:

$$K_{X_i Z_i} = \begin{pmatrix} K_{X_i Y_i}, K_{X_i \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{X_i \hat{X}_{i-k}^*}, \dots, K_{X_i \hat{X}_{i-r+1}^*} \\ \dots \\ K_{X_{i-k} Y_i}, K_{X_{i-k} \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{X_{i-k} \hat{X}_{i-k}^*}, \dots, K_{X_{i-k} \hat{X}_{i-r+1}^*} \\ \dots \\ K_{X_{i-r+1} Y_i}, K_{X_{i-r+1} \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{X_{i-r+1} \hat{X}_{i-r}^*}, \dots, K_{X_{i-r+1} \hat{X}_{i-r+1}^*} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$K_{Z_i} = \begin{pmatrix} K_{Y_i Y_i}, K_{Y_i \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{Y_i \hat{X}_{i-k}^*}, \dots, K_{Y_i \hat{X}_{i-r+1}^*} \\ \dots \\ K_{\hat{X}_{i-k}^* Y_i}, K_{\hat{X}_{i-k}^* \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{\hat{X}_{i-k}^* \hat{X}_{i-k}^*}, \dots, K_{\hat{X}_{i-k}^* \hat{X}_{i-r+1}^*} \\ \dots \\ K_{\hat{X}_{i-r+1}^* Y_i}, K_{\hat{X}_{i-r+1}^* \hat{X}_{i-1}^*}, \dots, K_{\hat{X}_{i-r+1}^* \hat{X}_{i-r}^*}, \dots, K_{\hat{X}_{i-r+1}^* \hat{X}_{i-r+1}^*} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где автокорреляционные и взаимно корреляционные моменты $K_{X_g Y_i}, K_{X_i \hat{X}_g^*}, K_{Y_i Y_i}, K_{Y_i \hat{X}_g^*}, K_{\hat{X}_g^* Y_i}, K_{\hat{X}_g^* \hat{X}_g^*}$ оцениваемых сигналов X_i , результатов измерения Y_i в i -ый момент времени, сигналов X_g и оптимальных оценок \hat{X}_g^* в моменты времени $g = i-1, i-2, \dots, i-r+1$

Оптимальный вектор размерности $g \times g$ оценок фильтрации и интерполяции сигнала X_i в i -ый момент времени определяется соотношением [4,5]

$$\hat{X}_i^* = A_i^* \cdot Z_i + \hat{X}_{H_i} \quad (7)$$

Вектор \hat{X}_{H_i} – размерности $r \times 1$, обеспечивающий несмещённость оценок, определяется соотношением [4,5]

$$\hat{X}_{H_i} = [I - A_i^*] \cdot M[X_{1i}] - A_i^* \cdot M[H_{1i}], \quad (8)$$

$$i = r, r+1, \dots, n.$$

где $M[X_{1i}]^T = \{M[X_i], M[X_{i-1}], \dots, M[X_{i-r+1}]\}$ – математическое ожидание вектора X_{1i} размерности $r \times 1$ в i -ый момент времени, определяемый, математическими значениями сигнала $M[X_k], k=i-1, i-2, \dots, i-r+1$, $M[H_{1i}]^T = [M[H_i], M[E_{i-1}^*], \dots, M[E_{i-r+1}^*]]$ – вектор размерности $r \times 1$, определяемый математическими ожиданиями $M[H_i]$ помехи H_i в i -ый момент времени и ошибками оптимальной оценки $M[E_k^*], k=i-1, i-2, \dots, i-r+1$, которые, как и \hat{X}_{H_i} в силу рассматриваемой постановки задачи полагаем равными нулю, I – единичная матрица размерности $g \times g$.

Если апостериорная плотность распределения сигнала является симметричной и унимодальной, что, в частности, выполняется при нормальных законах распределений сигнала и помех для модели измерения (1) и показателем оптимальности является средний квадрат ошибки оценки, то полученные оптимальные оценки будут наилучшими в классе всевозможных оценок на основе свойства байесовых оценок [1,2,4,5,7], в противном случае, они являются оптимальными в выбранном классе линейных оценок.

Из соотношения (3) можно получить следующие важные матричные выражения, которые включают в себя и, уравнение Винера [4,5]:

$$K[(\hat{X}_i^* \times \hat{X}_i^*)] = K[(X_i \times \hat{X}_i^{*T})], \quad (9)$$

$$K[(X_i \times Z_i^T)] = K[(\hat{X}_i^* \times Z_i^T)].$$

Из соотношений (9) и свойства некоррелированности сигнала и помехи следуют следующие соотношения для скалярных величин:

$$K[(\hat{X}_i^*)^2] = K[(X_i \hat{X}_i^*)],$$

$$K[(X_i Y_{i-p})] = K_{X_{i,i-p}}, \quad (10)$$

$$K[(X_{i-1} \hat{X}_{i-d}^*)] = K[(\hat{X}_{i-1}^* \cdot \hat{X}_{i-d}^*)],$$

где $p = 0, 1, \dots, r-1, d = 1, 2, \dots, r-1$,

где $K_{X_{i,i-p}}$ – взаимный корреляционный момент сигнала X_i в моменты времени i и $i-p$. На основе соотношений (10) можно сделать вывод о том, что в случае оптимальной линейной оценки входных сигналов (3) в соответствии с соотношением (7) взаимная корреляция оптимальных оценок и взаимная корреляция сигнала и оптимальной оценки совпадают при использовании модели измерения (1).

На основании соотношений (4), (8), (10) и учитывая некоррелированность сигнала и помехи измерения выражения (5), (6) можно представить в следующем виде:

$$KxI_i = \begin{pmatrix} Kx_i x_i, Kx_i x_{i-1}, \dots, Kx_i x_{i-k}, \dots, Kx_i x_{i-r+1} \\ \dots \\ Kx_{i-k} x_i, Kx_{i-k} x_{i-1}, \dots, Kx_{i-k} x_{i-k}, \dots, Kx_{i-k} x_{i-r+1} \\ \dots \\ Kx_{i-r+1} x_i, Kx_{i-r+1} x_{i-1}, \dots, Kx_{i-r+1} x_{i-r}, \dots, Kx_{i-r+1} x_{i-r+1} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Выражение для матрицы корреляционных моментов ошибок произвольных оценок можно определить следующим соотношением [4.5]:

$$K\varepsilon_i = KxI_i - Kxz_i \cdot A_i^{*T} - A_i^* \cdot Kxz_i^T + K\hat{x}_i^* \quad (16)$$

После окончания переходного процесса при использовании оптимальной оценки элементы матриц $K\varepsilon_i^*$ и $K\varepsilon_i$ совпадут. След корреляционной матрицы моментов ошибок оптимальных оценок определит качество фильтрации и интерполяции используемых алгоритмов оценок.

3. Спектрально-финитная оптимальная фильтрация с обратной связью дискретных сигналов

Представление оптимальной оценки в виде соотношений (2), (4), (7), (8), (13), (14), (16) при больших значениях r и многомерном векторе X_i требует заметного объема памяти при обработке информации. В связи с этим целесообразно преобразовать финитно-временной алгоритм оптимальной оценки в алгоритм спектрально-временной квазиоптимальной оценки без заметной потери точности. Указанное преобразование позволяет не только значительно снизить размерности векторов и матриц, используемых в обработке информации, но и использовать спектральное представление сигналов для решения ряда важных задач в области прогнозирования сигналов, оценки вероятности невыхода сигнала за пределы поля допуска на интервале времени, оценки достоверности процесса контроля и т. д. [10,11].

Основная цель использования спектрально-временной оценки сигналов заключается в эффективном сжатии информации при спектральном преобразовании наблюдаемых сигналов. При этом наиболее эффективным спектральным представлением сигнала на финитном дискретном интервале времени является использование представления сигнала рядом Карунена-Лозва [5,8,12]. Этот ряд обладает рядом важных свойств, к которым можно отнести следующие:

1. ряд Карунена-Лозва является частным случаем разложения Фурье, поэтому обладает всеми достоинствами этих рядов;
2. Карунена-Лозва имеет наилучшую сходимость в среднеквадратичном смысле из всех рядов Фурье;
3. коэффициенты разложения, т.е. спектральные компоненты Карунена-Лозва являются некоррелированными случайными величинами, а при нормальном законе распределения сигнала и независимыми, что значительно упрощает анализ и синтез линейных информационно-измерительных систем;
4. при положительно определённой корреляционной функции оцениваемого сигнала

собственные функции разложения образуют полной ортогональный или ортонормальный ряд, а сумма собственных значений есть значение энергии процесса на выбранном интервале и их значения определяют дисперсии спектральных компонент разложения.

Как известно [12], разложение Карунена-Лозва на финитном дискретном интервале, содержащем " r " отчётов, имеет конечное число " r " спектральных компонент и определяется " r " собственными числами и собственными функциями корреляционной матрицы размерности $k \times k$ вещественного временного ряда.

Используя стандартные процедуры, определим собственные числа и собственные векторы матрицы $Kx_i z_i$, определяемой соотношением (11)..

Например, в программном продукте Mathcad -15 определение упорядоченных собственных значений матрицы $Kx_i z_i$ можно осуществить с помощью оператора "reverse(eigenvals($Kx_i z_i$))", а матрицу упорядоченных собственных векторов с помощью оператора "reverse[(eigenvecs($Kx_i z_i$))]^T".

Учитывая, что для практически используемых оцениваемых сигналов собственные упорядоченные по величине числа корреляционных матриц временных рядов X_i характеризуются тем, что первое значение значительно превосходит остальные, без заметной потери качества оценки сигналов в дальнейшем целесообразно из набора k компонент учитывать одну, две компоненты. Это равносильно тому, что энергия сигнала, определяемого дисперсией и длительностью интервала времени, на котором осуществляется спектральное представление сигнала, в основном содержится в первой и значительно меньше уже во второй и других спектральных компонентах. Ограничение количества учитываемых компонент при оценке сигналов эквивалентно также предварительной низкочастотной фильтрации, т.к. при этом не учитываются высокочастотные компоненты. Является ли учитываемое число спектральных компонент, допустимым с точки зрения требуемого качества фильтрации сигналов, легко проверяется соотношениями для оценки качества спектрально-финитной обработки информации, приведёнными ниже. Ограничимся в дальнейшем числом учитываемых собственных чисел и векторов $s_i \leq r$.

Пусть DD_s – вектор размерности $s_i \times 1$, упорядоченных по убыванию величин собственных

значений DD_s^j матрицы $KX_i Z_i$, $j=1,2,\dots,s$, $s=i-1,\dots,i-g+1$; BB_s – матрица размерности $g \times s$ собственных векторов матрицы $KX_i Z_i$ на i - шаге оценки сигналов, соответствующих s_i первым, учитываемых собственным чисел. Столбец матрицы BB_s с индексом j соответствует собственному значению DD_j^i , $j=1,2,\dots,s_i$. Выбор величины s_i можно осуществить из сравнения энергии оцениваемого сигнала на интервале разложения с используемой в процессе оценки долей энергии сигнала, определяемой значением d_i . Введём показатель выбора s_i , учитывающий используемую долю энергии сигнала в обработке информации, в виде следующего соотношения:

$$\min_{s_i} R_i^{s_i} = \frac{\sum_{j=1}^{s_i} DD_j^i}{\sum_{j=1}^g DD_j^i} \geq R_i^{tp}, \quad (17)$$

где - R_i^{tp} требуемое значение показателя для предварительного выбора величины s_i , определяющего потерю точности обработки в в связи с неполным использованием энергии оцениваемого сигнала. На выбор величины s_i влияет также мощность помехи, определяемая дисперсией DH_i $i=1,2,\dots,N$. Окончательную оценку значения s_i можно произвести по результатам оценки качества фильтрации сигнала.

Спектральное представление $CKX_i Z_i s_i$ размерности $s_i \times s_i$ взаимной корреляционной матрицы $KX_i Z_i$ на i - ом шаге будет иметь вид [10]

$$CKX_i Z_i s_i = BB_s^T \cdot KX_i Z_i \cdot BB_s. \quad (17)$$

Спектральное представление корреляционной матрицы Kz_i размерности $s_i \times s_i$ можно определить следующим образом:

$$CKz_s = BB_s^T \cdot Kz_i \cdot BB_s. \quad (18)$$

Оптимальная линейная оценка $\hat{X}_{s_i}^*$ сигнала X_{1i} размерности $g \times 1$ в i -ый момент времени при использовании выражений (9) и (10) будет равна

$$\hat{X}_{s_i}^* = BB_{s_i} (CA_{s_i}^*) \cdot BB_{s_i}^T \cdot Z_i + \hat{X}_{N1_i}, \quad (19)$$

$CA_{s_i}^*$ -матрица размерности $s_i \times s_i$ оптимальных коэффициентов спектрально-финитной оценки сигнала X_{1i} , в i -ый момент времени, в соответствии со следствием теоремы ортогонального проецирования определяется соотношением:

$$CA_{s_i}^* = CKxzs_i \times CKzs_i^{-1}, \quad (20)$$

$CKxzs$ и $CKzs$ матрицы размерности $s_i \times s_i$ определённые соотношениями (17) и (18).

As_i^* -матрицу размерности $g \times g$, определяющую во временной области оператор оптимальной оценки вектора X_{1i} в i - ый момент времени при

использовании s_i спектральных компонент сигнала можно представить в следующем виде:

$$As_i^* = BB_{s_i} \cdot CA_{s_i}^* \cdot BB_{s_i}^T. \quad (21)$$

Оптимальная оценка $\hat{X}_{s_i}^*$ (14) сигнала X_{1i} является вектором размерности $g \times 1$, из которых первая компонента является оптимальной оценкой в i -ый момент времени, а остальные составляющие характеризуют оптимальные интерполированные оценки полезного сигнала в моменты времени $j=i-1,\dots,i-g+1$.

4. Оценка качества спектрально-временной фильтрации с обратной связью дискретных сигналов

Оценка точности оптимально-финитной оценки сигнала X_{1i} в i -ый момент времени определяется следующим соотношением:

$$DE_{opt_i} = \text{Tr}\{ K\epsilon_{opt_i}^* \},$$

где - $K\epsilon_{opt_i}^*$ -матрица размерности $g \times g$ корреляционных ошибок оптимальных оценок $\hat{X}_{1_i}^*$ в i - ый момент времени равна [4,5]

$$K\epsilon_{opt_i}^* = Kx_{1_i} - K\hat{x}_{1_i}^*, \quad (22)$$

$\text{Tr}\{ \}$ - след матрицы, $K\hat{x}_{1_i}^*$ - корреляционная матрица размерности $g \times g$ оптимальных оценок с учётом s_i спектральных компонент финитно-спектрального представления сигнала равна [4,5]

$$K\hat{x}_{1_i}^* = BB_{s_i} \cdot CA_{s_i}^* \cdot CKz_s \cdot CA_{s_i}^{*T} \cdot BB_{s_i}^T. \quad (23)$$

Для оценки точности фильтрации оценок в i -ый момент времени достаточно использовать первую диагональную компоненту $K\epsilon_{opt_i}^*$ матрицы $K\epsilon_{opt_i}^*$

$$DE_{opt_i} = K\epsilon_{opt_i,1,1}^*. \quad (24)$$

Другое соотношение для оценки качества обработки сигналов в виде матрицы размерности $s \times s$, справедливое для произвольного вида оценок, можно представить в следующем виде [4,5];

$$DE_{prd_i} = \text{Tr}\{ K\epsilon_{prd_i} \},$$

где - $K\epsilon_{prd_i}$ - матрица размерности $k \times k$ корреляционных ошибок оценок \hat{X}_i^* в i - ый момент времени

$$K\epsilon_{pr_i}^* = K\hat{x}_{1_i}^* - As_i^* \cdot Kyx_{1_i} - (As_i^* \cdot Kyx_{1_i})^T + Kx_{1_i} \quad (25)$$

Для оценки точности фильтрации оценок также достаточно использовать первую диагональную компоненту матрицы $KEpr_i$

$$DEprfs_i = K\varepsilon^* pr_{i,1,1} \quad (26)$$

Для повышения точности оценки целесообразно увеличить значение r , т.е. глубину используемой памяти результатов измерений, использовать более точные измерители и выбрать величину используемых спектральных компонент s_i , позволяющую обеспечить требуемое отношение дисперсий помех к дисперсии ошибки оптимальной оценки.

Учитывая, что спектрально-финитная фильтрация является оптимальной, то после окончания переходного процесса оценки точности, полученные по формулам (18) и (19) совпадут.

Время переходного процесса зависит от того насколько начальные значения для оценок будут отличаться от реальных значений, полученных на первых шагах оценок.

В качестве начальных значений в моменты времени $r=0,1,\dots,r-1$ необходимо задать векторы размерностью $r \times 1$ результатов измерений Y_{1r} и начальных значений вектора X_{n1r} .

$$Y_{1r} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ Y_r \end{pmatrix}, \quad X_{n1r} = \begin{pmatrix} M[X_1] \\ M[X_2] \\ \cdot \\ M[X_r] \end{pmatrix},$$

где $M[X_r]$ – математические ожидания сигнала в моменты времени $r=0,1,\dots,k-1$.

Заключение

Предлагаемые оптимальные линейные рекуррентные финитно-временной и спектрально финитной методы оценки сигнала являются универсальными с точки зрения вида используемых моделей сигналов, инвариантны к наличию или отсутствию свойства коррелированности помехи измерения, не требует марковского свойства и представления модели сигнала в пространстве состояний. При реализации алгоритма оценки в отличие от фильтрации Калмана не требуется решать уравнение Риккати и определять матрицу усиления Калмана, что значительно упрощают алгоритмы обработки сигналов. Требуемый объем априорной информации определяется знанием математических ожиданий и корреляционных функций сигнала и помехи в i -ый момент времени. Характеристики точности фильтрации исследуемого алгоритма оценки при корректном прогнозе взаимных корреляционных моментов оптимальных оценок совпадут с точностью оценки метода Калмана. Наряду с фильтрацией результатов измерений алгоритм обеспечивает оптимальные оценки интерполяции сигнала. При этом спектрально-финитная фильтрация обеспечивает сжатие информации о полезном сигнале, предварительную перед оптимальной оценкой фильтрацию сигнала и дополнительное упрощение алгоритма обработки информации.

В качестве недостатков метода можно отметить то, что для начала работы алгоритма требуется накопление " r " начальных статистик и возникает некоторая априорная неопределенность при задании величины " v ", которая устраняется при анализе модели сигнала или при оценке точности алгоритма оценки в процессе его моделирования.

Литература

1. Э. Сейдж, Дж. Мелс. Теория оценивания и её применение в связи и управления. - М.: Связь, 1976. - 495с.
2. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. - М.: Энергия, 1973. - 440с.
3. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана. - М.: Гелиос АРВ, 2008. - 408с
4. Ю.П.Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. - Л.: Машиностроение, 1984. - 208с..
5. Иванов Ю.П., В.Г. Никитин В.Г. Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных, критерии оптимизации и свойства оценок. Учебное пособие. С.ПГУАП, С.П. 2011. с.102
6. Пугачёв В.С. Теория случайных функций. М.: Физматгиз. 1962. с. 882.
7. Иванов Ю.П. Финитно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов. Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. №5 2018г. с.23-28.
8. Френкс Л. Теория сигналов. - М.: Советское радио, 1974. с.344с.
9. В.Т. Тихонов, В.Н. Харисов. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем М. "Радио и связь", 1991, 608 с.
10. В. П. Перов. Прикладная спектральная теория оценивания М. "Наука" ГРФМЛ, 1982, с.432.
11. Ю.П. Иванов. Метод оценки достоверности аттестации и прогнозирования состояния измерительных систем. НТЦ "Информтехника" М. Оборонная техника № 9./10 1995, с56-61.
12. Г. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляция. М. "Сов. Радио", 1972 с.744.

References

1. E. Sage, J. Mels. Teoriya otsenivaniya i ee primeneniye v svyazi i upravleniya [Theory of estimation and its application in communication and management] // M.: Svyaz, 1976. - 495с.
2. Medich J. Statisticheski optimalnye lineinye otsenki i upravlenie [Statistically optimal linear estimates and control] // M.: Energia, 1973.- 440s.
3. Shakhhtarin B. I. Filtry Vinera i Kalmana [Wiener and Kalman filters] // M.: Gelios ARV, 2008. - 408s

4. Yu. P. Ivanov, A. N. Sinyakov, I. V. Filatov. Kompleksirovanie informatsionno-izmeritelnykh ustroystv letatelnykh apparatov [Complexing of information and measuring devices of aircraft] // L.: Mashinostroenie, 1984. - 208s..
5. Ivanov Yu. P., V. G. Nikitin V. G. Informatsionno-statisticheskaya teoriya izmerenii. Metody optimalnogo sinteza informatsionno-izmeritelnykh, kriterii optimizatsii i svoystva otsenok. [Information and statistical theory of measurements. Methods of optimal synthesis of information and measurement, optimization criteria, and properties of estimates] // Uchebnoe posobie. .SPGUAP, S p. 2011. p. 102
6. Pugachev V. S. Teoriya sluchainykh funktsii [Theory of random functions] // M.: Fizmatgiz. 1962. p. 882.
7. Ivanov Yu. P. Finitno-vremennoi metod optimalnoi filtratsii diskretnykh signalov. [Finitno-temporal method of optimal filtering of discrete signals] // Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol, Diagnostika. No. 5, 2018. p. 23-28.
8. Franks L. Teoriya signalov [Theory of signals] // M.: Sovetskoe radio, 1974. p. 344s.
9. V. T. Tikhonov, V. N. Kharisov. Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem [Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems] // M. "Radio i svyaz", 1991, 608 p.
10. V. P. Perov. Prikladnaya spektralnaya teoriya otsenivaniya [Applied spectral theory of estimation] // M. "Nauka" GRFML, 1982, p. 432.
11. Yu. P. Ivanov Metod otsenki dostovernosti attestatsii i prognozirovaniya sostoyaniya izmeritelnykh sistem [Method for assessing the reliability of certification and forecasting the state of measurement systems] // NTC "Informtekhnika" M. Oboronnaya tekhnika No. 9./10 1995, s56-61
12. G. Van Tris. Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsiya [Theory of detection, estimation, and modulation] // M. "Sov. Radio", 1972 p. 744.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Павлович Иванов, кандидат технических наук, доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, литера А (Центральный район), e-mail: ypi35@mail.ru

Yuriy P. Ivanov, senior lecturer, PhD (Eng), in Engineering Science, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", 67, litera A (Central District), Bolshaya Morskaya str Saint Petersburg, 190000, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: ypi35@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

Показатели экологической безопасности водного транспорта

В.Ю. Каминский¹, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, **Д.А. Скороходов¹**, e-mail: skorohodda@mail.ru,
С.Н. Турусов², e-mail: serniktur@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Всероссийский научно - исследовательский и технологический институт электромашиностроения

Аннотация. В статье сформирована структура показателей оценки безопасности для транспортных средств морского и внутреннего водного транспорта. Каждый компонент структуры включает от двух до пяти составляющих. Обоснованы группы оценочных критериев: функциональные, экономические, социальные, экологические и информационные. Установлено, что в качестве основных критериев безопасности водных транспортных средств целесообразно рассматривать значения концентраций опасных веществ (экологическая безопасность), уровень шума на судах (экологическая безопасность), уровень аварийности и травматизма на судне (функциональная безопасность), уровень ущерба от аварий и инцидентов на судне (функциональная безопасность) и уровень риска, как интегральный критерий безопасности. Показаны причины возникновения технических аварийных ситуаций, которые связаны с недостатками в организации работы судовых экипажей, с низкой квалификацией личного состава, с ошибочными действиями береговых служб управления, технического обслуживания и судоремонта. Утверждается, что для получения количественных показателей безопасности водной транспортной системы необходимо разработать модели безопасности для её элементов с учетом разнообразных ситуаций и определить вероятностные характеристики частных событий (аварий и инцидентов), входящих в модели безопасности.

Ключевые слова: авария, безопасность, инфраструктура, критерий, система, структура, судно, служба, управление.

Evaluating the effectiveness of a shipping company environmental protection

Valery Yu. Kaminsky¹, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, **Dmitriy A. Skorokhodov¹**, e-mail: skorohodda@mail.ru,
Sergey N. Turusov², serniktur@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation, ²JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The structure of safety assessment indicators for sea and inland water transport vehicles is formed in the article. Each component of the structure includes from two to five components. The groups of evaluation criteria are justified: functional, economic, social, environmental and informational. It is established that as the main criteria for the safety of water vehicles, it is advisable to consider the values of concentrations of hazardous substances (environmental safety), the noise level on ships (environmental safety), the level of accidents and injuries on the ship (functional safety), the level of damage from accidents and incidents on the ship (functional safety) and the level of risk as an integral safety criterion. The reasons for the occurrence of technical emergencies are shown, which are associated with shortcomings in the organization of the work of ship crews, low qualification of personnel, with erroneous actions of the coastal management services, maintenance and ship repair. It is argued that in order to obtain quantitative indicators of the safety of a water transport system, it is necessary to develop safety models for its elements taking into account various situations and to determine the probabilistic characteristics of particular events (accidents and incidents) included in the safety models.

Keywords: accident, safety, infrastructure, criterion, system, structure, vessel, service, management.

Введение

Система водного транспорта (ВТС) включает сухопутную компоненту (порты, причалы, судоремонтные доки), водную инфраструктуру (судоходные пути, каналы, фарватеры), а также флот (суда). Безопасность функционирования этой структуры необходимо оценивать в рамках системной методологии.

Безопасность системы зависит от состояния каждого её элемента и от их взаимодействия. Определяя понятие безопасности, говорят о безопасности пассажира, транспортного средства, о грузовой безопасности, об экологической безопасности и т.д. Совершенно очевидно, что определение безопасности как положения, при котором опасность не угрожает кому-либо, чему-либо, не проясняет ситуацию. Во-первых, техническое сооружение или устройство, окружающая среда, вещества, содержащие аккумулированную энергию, представляют собой

потенциальную опасность. Во-вторых, требует оценки тяжести последствий по тому или иному аварийному сценарию. В этом смысле опасным является такой аварийный сценарий, при котором гибнут люди, прекращается функционирование элементов водной транспортной системы [1].

Определим безопасность элемента ВТС как его свойство функционировать без инцидентов, а при их возникновении – как способность восстанавливать рабочие параметры штатного функционирования [2]. В таком случае оценка уровня безопасности – это оценка вероятности возникновения инцидентов или способности восстановления параметров функционирования после их возникновения. Очевидно, что вероятность возникновения инцидентов является функцией вероятностей влияния неблагоприятных факторов, а способность восстановления параметров функционирования зависит от мер технического и организационного характера, а также от тяжести аварии.

Для оценки степени потенциальной угрозы безопасности ВТС на объектах их инфраструктуры может быть использовано категорирование опасных элементов. Категория опасности – комплексная характеристика, которая отражает степень потенциальной угрозы безопасности ВТС в случае возникновения аварий или опасных ситуаций на объектах транспортной инфраструктуры [3]. Критерии категорирования элементов инфраструктуры устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, уполномоченным в области водного транспорта, по согласованию с уполномоченным федеральным органом исполнительной власти. Категорирование элементов инфраструктуры как процесс, завершающийся присвоением категории, осуществляется компетентной организацией в области безопасности с участием специализированных организаций.

1. Структура безопасности водной транспортной системы

При оценке безопасности ВТС следует учитывать функциональную структуру системы. Выделим основные составляющие безопасности [4,5].

1.1. Безопасность транспортных процессов – свойство транспортных процессов быть безопасными или обладать приемлемым уровнем безопасности для участников этих процессов, функциональных элементов ВТС, окружающей среды и населения. Под транспортным процессом понимается процесс перемещения судов, грузов и пассажиров с целью реализации основных функций транспортной системы (ТС). Безопасность транспортных процессов обеспечивается безопасностью судна, безопасностью коммуникаций и безопасностью транспортной инфраструктуры.

1.1.1. Безопасность судна – свойство судна функционировать безопасно или с нанесением допустимого ущерба окружающей среде, населению и другим элементам ВТС.

Выделяют собственную безопасность судна и безопасность перемещения грузов и пассажиров этим судном.

1.1.2. Безопасность коммуникаций – свойство водных коммуникаций быть безопасными или обладать приемлемым уровнем опасности для транспортных процессов, окружающей среды и населения. Безопасность коммуникаций включает собственную безопасность и безопасность движения судов по ним.

1.1.3. Безопасность инфраструктуры – свойство инфраструктуры быть безопасной или обладать приемлемым уровнем опасности для судов, окружающей среды и населения. Она включает: безопасность хранения грузов и транспортных средств, безопасность погрузочно-разгрузочных работ, безопасность строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры.

1.2. Безопасность системы управления судами – способность системы исключать или своевременно парировать возникновение инцидентов, аварийных или чрезвычайных ситуаций для отдельных судов, коммуникаций и объектов транспортной инфраструктуры.

Безопасность системы управления обеспечивается за счет мониторинга, контроля и прогнозирования процессов, протекающих в ВТС, и

обеспечивается информационной безопасностью системы и ее компонентов, надежностью и готовностью средств дистанционного контроля и управления, надежностью системы управления работой судов.

1.3. Экологическая безопасность – это свойство судна быть безопасным для окружающей среды и населения.

Рост интенсивности транспортных потоков существенно ухудшает экологическую обстановку в районах расположения основных транспортных коммуникаций. При строительстве новых портов, а также в ходе модернизации существующих, далеко не всегда соблюдаются действующие экологические нормы и не всегда оцениваются экологические последствия принимаемых решений. При этом увеличиваются экологические риски, возникают патогенные зоны, растёт социальная напряженность.

Экологическая безопасность [6,7] характеризуется уровнем загрязнений (по видам веществ и физическим полям), т.е. объемом вредных веществ (излучений), попадающих в природную среду в процессе нормального (штатного) функционирования ВТС. Экологическая безопасность также определяется экологическим ущербом, связанным с загрязнением водной среды, т.е. затратами на проведение мероприятий по устранению последствий загрязнений. И, наконец, безопасность характеризуется экологическим риском, т.е. вероятностью возникновения аварийных ситуаций, оказывающих влияние на состояние окружающей среды.

1.4. Экономическая безопасность – свойство ВТС обеспечивать безопасность экономической, инвестиционной и иной коммерческой деятельности системы при возникновении различного рода опасных и чрезвычайных ситуаций.

1.5. Террористическая безопасность – способность ВТС и ее составляющих противостоять целенаправленному воздействию, препятствующему нормальной работе системы, и, в случае возникновения террористических атак, обеспечивать безопасность транспортных процессов, коммуникаций и населения.

Сформированная структура безопасности ВТС требует дальнейшей детализации.

2. Критерии обеспечения безопасности

Безопасность системы водного транспорта связана с характеристиками её функциональных элементов и процессов – транспортных, информационных и финансовых, объединённых в иерархическую структуру, в общем случае, с противоречивыми частными целями и критериями эффективности, что объясняется решением, зачастую, прямо противоположных задач [8].

Для обеспечения безопасности ВТС требуется внедрение специализированных систем управления безопасностью (СУБ). Система управления безопасностью – комплексная организационно-техническая система, выполняющая функции анализа состояния, контроля и обеспечения безопасности, как отдельных функциональных элементов и процессов транспортной системы, так и системы в целом. СУБ строится по иерархическому принципу. Каждый уровень структуры представляет собой иерархическую систему, отражающую

соподчиненность и взаимосвязи между функциональными элементами ВТС. Для оценки различных аспектов функционирования ВТС целесообразно использовать следующие группы критериев [9]:

1) Функциональные, характеризующие степень полноты выполнения ВТС и ее элементами основных функциональных задач – перевозки грузов и пассажиров.

2) Экономические, характеризующие экономическую эффективность функционирования системы и ее элементов.

3) Социальные, характеризующие различные социальные последствия функционирования ВТС и ее элементов.

4) Экологические, характеризующие влияние системы и ее элементов на природную среду, жизнедеятельность человека, а также возможные экологические последствия этого влияния.

5) Информационные, характеризующие информационные процессы, протекающие в ВТС и обеспечивающие адекватное и своевременное представление деятельности различных субъектов рынка транспортных услуг.

Всесторонняя оценка риска возникновения аварий основывается на анализе причин опасных ситуаций (отказов технических устройств, ошибок персонала, внешних воздействий) и условий развития аварий.

Итак, в качестве основных критериев безопасности ВТС будем рассматривать:

- величины концентрации опасных веществ (экологическая безопасность);
- уровень шума на судах (экологическая безопасность);
- уровень аварийности и травматизма на судне (функциональная безопасность);
- уровень ущерба от аварий и инцидентов на судне (функциональная безопасность);
- уровень риска как интегральную характеристику безопасности.

При анализе опасностей, связанных с отказами технических устройств, оценивают технический риск, показатели которого определяются методами теории надежности. Так же необходимо учесть индивидуальный риск – частоту поражения индивидуума (человека) в результате воздействия исследуемых факторов опасности. Индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу подвергнутых риску за определенный период времени.

Комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является потенциальный территориальный риск – частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории. Потенциальный риск выражает максимально возможную опасность для объектов воздействия, находящихся в данной точке пространства. Как правило, потенциальный риск оказывается промежуточной мерой опасности, используемой для оценки социального и индивидуального риска при крупных авариях. Распределение потенциального риска и распределение населения в исследуемом районе позволяют получить количественную оценку социального риска для населения. Для этого нужно

определить число пораженных при каждом сценарии от каждого источника опасности и, затем, определить частоту негативных событий. Другой интегральной мерой опасности является коллективный риск, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенный период времени.

Для экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является статистически ожидаемый ущерб, который выражается в стоимостных или натуральных показателях (математическое ожидание ущерба или сумма произведений вероятностей причинения ущерба за определенный период, умноженное на величину этих ущербов).

Для оценки безопасности ВТС целесообразно использовать следующие показатели:

1. Вероятность возникновения инцидентов (реализация класса риска) за время функционирования объекта $Q(t)$; где t – время.

2. Ожидаемые средние затраты на предупреждение инцидентов и снижение возможного ущерба $M_i[S]$; где S – число происшествий.

3. Ожидаемый средний ущерб от инцидентов $M_i[S]$.

В общем случае при анализе риска аварии приходится иметь дело с неточными и неполными исходными данными, а в ходе анализа учитывается лишь основная часть спектра сценариев возможных аварий на ВТС. В самом простом случае для решения подобных задач в дополнение к методам теории вероятностей могут использоваться методы математической статистики, как для определения законов распределения потерь при аварии, так и для нахождения неизвестных параметров этих распределений.

При количественной оценке риска аварии задачей максимум является определение функций плотности вероятности потерь: материальных - G и людских - N . Задача минимум - оценка основных числовых характеристик (математическое ожидание, мода и дисперсия) G и N потерь.

3. Анализ аварийных ситуаций на морском и внутреннем водном транспорте

Причины роста аварийности на морском и внутреннем водном транспорте следует искать в экономических, технических, информационных аспектах и, конечно, в человеческом факторе.

Работа по навигационной безопасности судоходства, проводимая на федеральном уровне, основана на выполнении международных конвенций, требований национального законодательства и направлена на повышение уровня безопасности мореплавания и предупреждение аварийности судов, совершенствование государственного надзора за торговым мореплаванием. Однако ограниченные ресурсные возможности, а также доминирующие коммерческие интересы усугубляют риск аварий и происшествий. Качество работы судоходных компаний и государственных контролирующих органов обеспечения безопасности мореплавания оценивается показателями аварийности на флоте. Статистические данные свидетельствуют о том, что за последние десять лет уровень аварийности судов под российским флагом увеличился в 4 раза [10]. По классификации

Российского морского регистра судоходства (РМРС), основными причинами аварийных случаев являются нарушения Международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС-72) в море и Правил технической эксплуатации, ухудшение качества ремонта судов, значительный их возраст и соответственно выработанный ресурс судовых механизмов и оборудования. Судоводители не выполняют требований нормативных документов, не придерживаются правил плавания в сложных навигационных и гидрометеорологических условиях. Существенно увеличилось аварийные случаи (АС) с судами смешанного (река-море) плавания, а также с речными судами, выходящими в море (70% общего числа АС).

Пожары на судах составляют 4-8% аварийных случаев, что свидетельствует об ослаблении внимания со стороны судовладельцев к требованиям пожарной безопасности.

Доминирующей причиной, влияющей на аварийность, является человеческий фактор. Более чем в 85% случаев причинами аварий являются ошибки людей. К сожалению, приходится говорить о снижении базового уровня подготовки и недостаточных практических навыках членов экипажа судна, особенно пришедших на флот из смежных ведомств. Межведомственная миграция моряков приводит на мостик и в машинное отделение специалистов, не прошедших всех ступеней подготовки, либо прошедших их в ускоренном темпе. В системе дополнительной профессиональной подготовки законодательно не закреплена цикличность повышения квалификации моряков. Важнейшие элементы тренажерной подготовки по отработке навыков управления судном, по несению ходовой навигационной вахты - не являются обязательными. В некоторых судоходных компаниях наметились тенденции к снижению роли служб безопасности мореплавания, проходят сокращения капитанов-наставников, механиков, что отрицательно сказывается на работе по профилактике аварийности, на проведении политики обеспечения безопасности мореплавания. По-прежнему отмечается слабый уровень подготовки судовых специалистов. Наиболее часто аварийные ситуации происходят из-за навигационных ошибок (посадка судов на мель и столкновения). Штурманская работа на судах не организована должным образом. Контроль безопасности плавания путем непрерывного ведения исполнительной прокладки не осуществляется. При плавании в районах со стесненными условиями наблюдение не усиливается, не используются судовые радиолокационные станции, место нахождения судна не контролируется, выполняется лишь эпизодическое снятие координат с GPS. Причиной столкновений судов часто является нарушение Международных правил предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72). Контроль мореплавания и обеспечение безопасности судоходства в акватории порта и на подходах к нему не всегда выполняется с должной ответственностью. Имеются случаи передоверия управления судном лоцману.

Современные высокоавтоматизированные комплексы морской техники, управляемые автоматами по жестким алгоритмам, освободили

человека от большинства рутинных операций, оставив за ним функции эргатического резерва. Однако при этом усилилась зависимость безопасности сложных технологических процессов от эффективности управляющих воздействий лиц, принимающих решения (ЛПР) в экстремальных условиях и в аварийных ситуациях. При принятии решений необходимо в течение ограниченного времени продумать различные варианты решения, предусмотреть последствия каждого из них и выбрать лучший вариант. Отличительной особенностью подобной ситуации является невозможность заранее предусмотреть все множество «нештатных» ситуаций. При этом для сложных многофункциональных человеко-машинных систем невозможно не только вычислить оптимизируемый функционал, но даже представить его в явном виде.

Традиционная технология принятия управленческих решений базируется на использовании многочисленных наставлений, директивных, нормативных, правовых и технических документах на бумажных носителях, плохо приспособленных для оперативного поиска, восприятия и переработки необходимой информации. Общие положения и рекомендации, сформулированные в них, безусловно, полезны, но в экстремальных ситуациях традиционный формат не позволяют быстро находить эффективные управленческие решения. Многостраничная документация и правила ее применения не обеспечивают оперативного проведения численных оценок процессов, которые должны быть выполнены с упреждением по отношению к управляемым быстротекущим событиям.

В резолюции Международной морской организации (ИМО) отмечается, что «в настоящее время на современных технически оснащенных судах для принятия решений в аварийных случаях необходимо обращаться к большому числу наставлений и руководств, а находящиеся на мостике дисплеи цифровых не унифицированных приборов не позволяют легко и быстро обнаружить критические тенденции. Процесс поиска информации требует времени, а нерациональное размещение приборных дисплеев на мостике иногда приводит к еще большему замешательству». Эта резолюция отражает официальную точку зрения одной из авторитетных организаций в области безопасности мореплавания по результатам анализа катастрофы парома «Эстония». Для усовершенствования базы быстрого принятия решений в аварийных ситуациях на судах ИМО рекомендовала создание интегрированной системы контроля и принятия решений в аварийных ситуациях.

Статистика аварийных происшествий показывает, что, хотя прямые причины аварий часто можно отнести на счет действий отдельных лиц, доминирующими, чаще всего, являются ошибки группы лиц, т.е. ошибки организационные. Анализ специалистов-психологов показывает наличие все возрастающего разрыва между сложностью современной техники и психологическими возможностями человека как элемента сложной системы «человек - машина». Обслуживающий технику персонал средней квалификации не может оперировать углубленными знаниями в области

специальных разделов математики, теории управления и физики сложных процессов, без которых невозможно прогнозировать развитие аварийных процессов и принимать необходимые управленческие решения. Руководящая и операторская деятельность человека на борту судна информационно перегружена и плохо обеспечена технологией принятия управленческих решений, учитывающей психологическое состояние человека, особенно в экстремальных ситуациях. Не случайно, человеческий фактор доминирует среди всех причин аварийных происшествий и катастроф в таких отраслях мирового хозяйства, как транспорт, энергетика, военная техника, нефтегазодобыча и т.д. По данным страховых обществ, в области морского транспорта ошибки людей соотносятся с другими причинами аварий как 5:1.

В судоходных компаниях не редко анализ всех аварийных ситуаций выполняется поверхностно, члены экипажей судов информируются лишь о некоторых авариях, что противоречит кодексу международных стандартов и рекомендуемой практике расследования аварии или инцидента на море (кодекс расследования аварий), поскольку основная цель расследования аварий – их недопущение в будущем.

Очень важна реализация программ обновления флота и его технического перевооружения. Причины возникновения технических аварийных ситуаций зачастую связаны с большим возрастом судов. Работая в условиях жесткой конкуренции на рынке, в частности, морских транспортных услуг (отсутствие стабильной грузовой базы, относительно низкие фрахтовые ставки, значительное налоговое бремя, сложные таможенные процедуры), судоходные компании не уделяют должного внимания профилактической работе по снижению аварийности. Минимизация затрат судоходных компаний на техническое перевооружение и поддержание в требуемом техническом состоянии судна, его машин, механизмов, приборов и систем управления создают

предпосылки для возникновения аварий и инцидентов.

Важнейшим фактором снижения аварийности является обеспечение стабильной финансово-экономической работы флота. В значительной степени этому будет способствовать создание Российского международного реестра судов. Согласованные действия Российского морского регистра судоходства и судоходных компаний по доведению до каждого члена экипажа политики российского классификационного общества в области качества технического надзора - важный фактор снижения аварийности в отрасли.

4. Факторы, влияющие на безопасность судна

При анализе показателей безопасности работы ВТС, необходимо учитывать различные факторы, среди которых на первом месте те, которые оказывают влияние на безопасность самого судна. Эти факторы можно разделить на пять групп (рис.1):

- неудовлетворительные свойства судна: плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, управляемость, мореходность, прочность, живучесть;
- неблагоприятные внешние условия: ветер, волнение, течение, плохая видимость (туман, темное время суток), температура воздуха, айсберги, подводные препятствия (риффы, скалы, отмели), интенсивность судоходства, стесненность в районе плавания и т.д.;
- отказы судовых технических средств и оборудования;
- воздействие грузов, функциональных систем и устройств целевого назначения (промысловое оборудование, системы поиска и добычи полезных ископаемых со дна моря и др.);
- ошибки в действиях экипажа, пассажиров, персонала либо бездействие лиц, обеспечивающих безопасность судна.

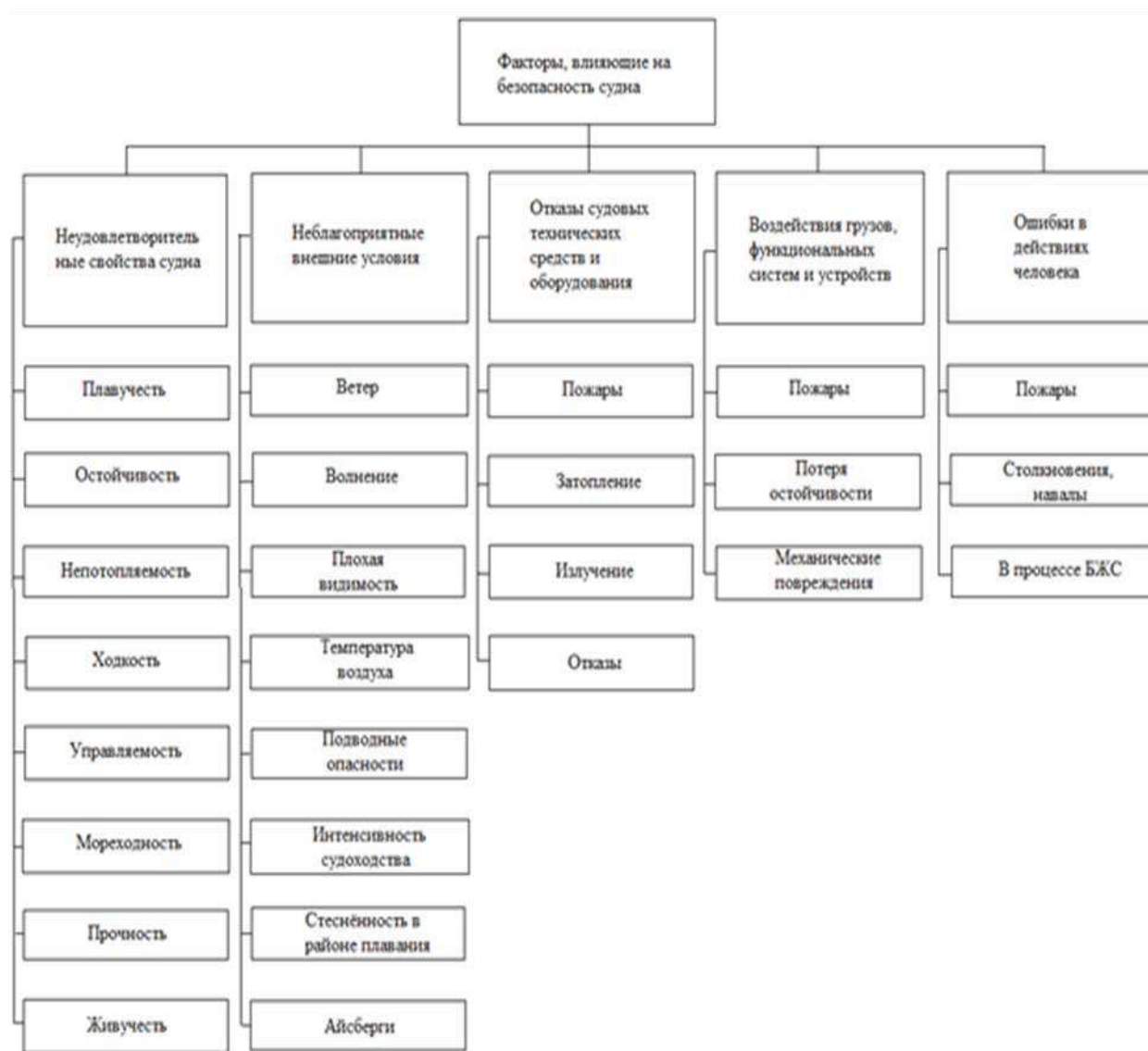


Рис.1. Факторы, оказывающие влияние на безопасность судна

Факторы, влияющие на безопасность человека (рис. 2):

- факторы, зависящие от степени безопасности и надежности судна как транспортного средства в нормальных и аварийных режимах, а также от состава и состояния судовых спасательных средств индивидуального и коллективного пользования;

- факторы, определяющие уровень организации и оснащенности поисково-спасательной службы в стране и взаимодействие ее с поисково-спасательными службами других стран;
- внешние воздействия, метеоусловия;
- психофизиологическое состояние и профессиональная подготовка, дисциплинированность экипажа.

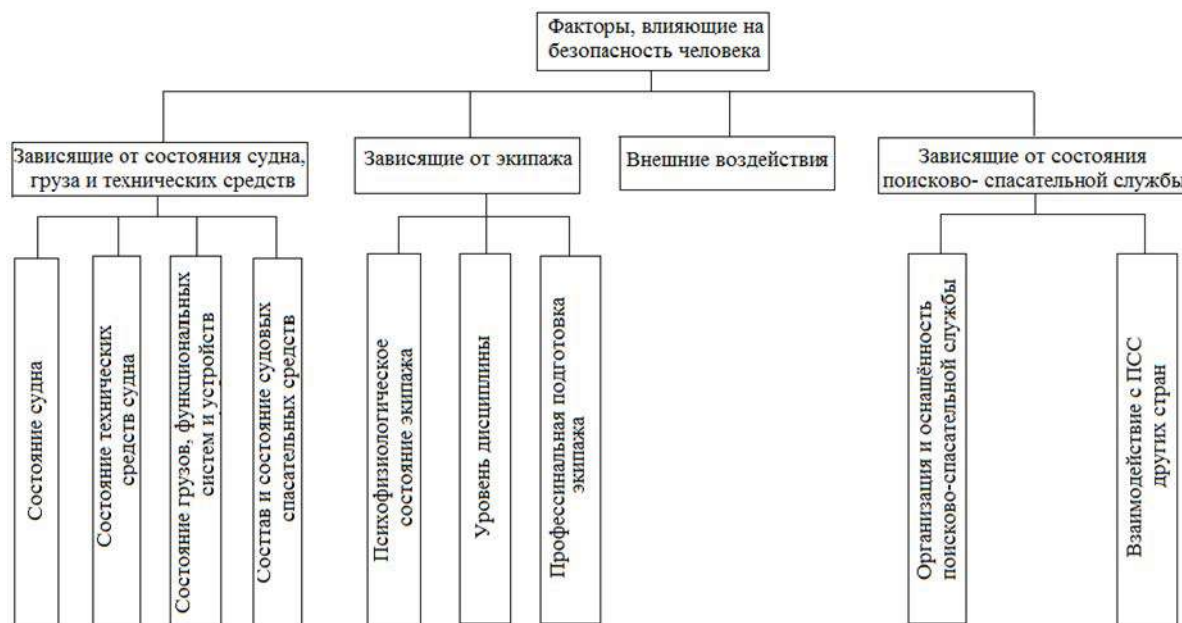


Рис.2. Факторы, влияющие на безопасность человека

Факторы, влияющие на безопасность окружающей среды (рис.3):

- аварийные повреждения судна или его технических средств, вызывающие разливы топлива и нефтепродуктов, радиоактивное заражение (аварии на судах с ядерными энергетическими установками и т. д.);
- несоблюдение правил хранения и перевозки опасных грузов или несовершенство этих правил;
- ошибочных действий экипажа при заправке топливом, погрузке-выгрузке опасных грузов,

осуществлении мер по борьбе за живучесть судна (БЖС) и др.;

- пожары и взрывы на судне, особенно находящемся вблизи других пожаро - и взрывоопасных судов и береговых объектов;
- использование типов судов, особенно быстроходных, создающих мощную волновую систему, приводящую к повреждениям и разрушениям берегов и береговых сооружений.

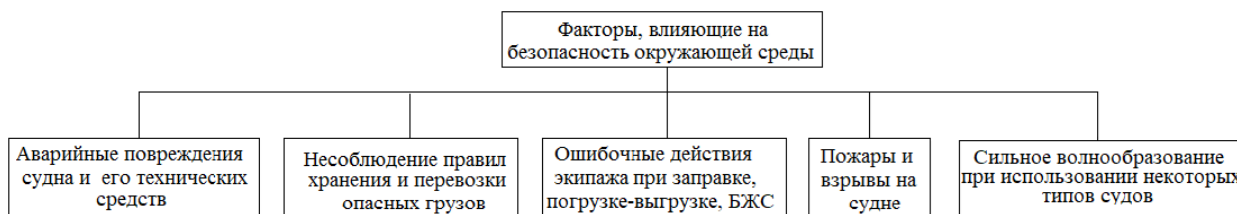


Рис.3. Факторы, влияющие на безопасность окружающей среды

Факторы, влияющие на безопасность груза (рис.4):

- физико-химические и другие свойства грузов;
- условия размещения груза на судне;

• внешние условия и воздействия: качка, крен, заливаемость, обледенение;

- аварийные повреждения судна и судовых технических средств, пожары и взрывы.

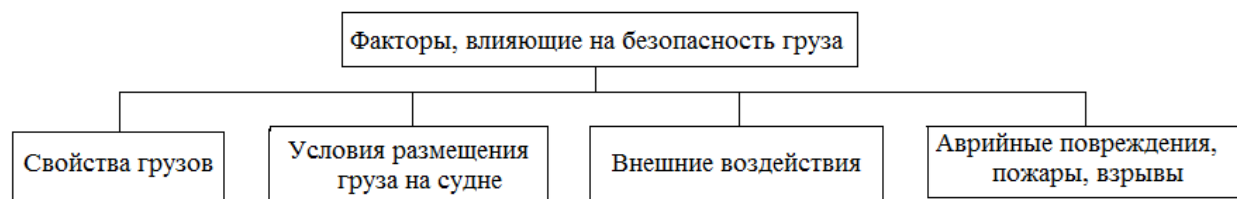


Рис.4. Факторы, влияющие на безопасность груза

Аналогично можно сформулировать факторы, влияющие на безопасность прочих элементов ВТС.

Перечисленные факторы, влияющие на безопасность, могут уточняться и дополняться. Чем подробнее учитывается влияние факторов, тем

точнее определение количественных показателей безопасности.

5. Принципы обеспечения безопасности судна

Безопасность ВТС предполагает отсутствие опасности (риска) для всех её элементов. Безопасность любого элемента ВТС определяется его способностью функционировать без происшествий и восстанавливать рабочие параметры после возникновения происшествия [11]. Безопасность, как показано выше, является сложной функцией разнообразных, как правило, случайных факторов. Одной из главных задач оценки безопасности является определение в формализованном виде функций

$$\begin{cases} P_c = F_1(\Phi_{c1}, \dots, \Phi_{ci}) \\ P_{\text{э}} = F_2(\Phi_{\text{э}1}, \dots, \Phi_{\text{э}j}) \\ P_{\text{ос}} = F_3(\Phi_{\text{ос}1}, \dots, \Phi_{\text{ос}q}) \\ P_{\text{эр}} = F_4(\Phi_{\text{эр}1}, \dots, \Phi_{\text{эр}r}) \end{cases}, \quad (1)$$

где $P_c, P_{\text{э}}, P_{\text{ос}}, P_{\text{эр}}$ - вероятности, относящиеся к судну, экипажу, окружающей среде, грузу; $\Phi_{ci}, \Phi_{\text{э}j}, \Phi_{\text{ос}q}, \Phi_{\text{эр}r}$ - факторы, влияющие на безопасность судна, экипажа, окружающей среды, груза.

Существующая система количественных показателей безопасности предназначена для оценки состояния уровня безопасности в отрасли, в стране, в мировом флоте. Для характеристики безопасности различных видов транспорта применяют статистические и вероятностные показатели, которые могут быть общими и частными, абсолютными и относительными.

Общие показатели характеризуют безопасность мореплавания независимо от причин аварийности, а частные - оценивают безопасность по конкретным причинам или группе причин аварийности.

К общим абсолютным статистическим показателям безопасности относятся: число аварий, число и валовая вместимость судов, попавших в аварию, число человеческих жертв, количество и стоимость погибшего груза и т.д., за определенный промежуток времени, например, за год. То же и частные абсолютные статистические показатели, но вызванные конкретной причиной. Подобная информация регулярно публикуется. Журнал «Морской флот» ежемесячно фиксирует общие абсолютные потери мирового флота (число судов и общая валовая вместимость), а также частные потери по аварийным причинам: столкновения, посадка на грунт, опрокидывание, пожары и взрывы, прочие причины.

Относительные показатели безопасности более универсальны, в них число аварий и потерь приводятся к определенному объему произведённых работ (число перевезённых пассажиров, грузов, число рейсов и их продолжительность или протяженность и т. д.). Относительные статистические показатели позволяют оценить достигнутый уровень безопасности, уровень совершенства судов, судовых технических средств, уровень организации и обеспечения аварийно-спасательных работ, степень подготовки и дисциплинированности экипажа. Главная ценность статистических показателей - объективность. Однако они отражают уже свершившиеся события и не могут быть использованы для решения перспективных

задач управления безопасностью и поиска путей предотвращения аварий.

Поскольку проявление большинства факторов, влияющих на безопасность, носит вероятностный характер, целесообразно показатели уровня безопасности выражать в виде вероятностей. Например, вероятность безопасного плавания без аварийных происшествий можно представить показателем

$$P_{\text{б}} = \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{aci}}), \quad (2)$$

где P_{aci} - вероятность появления аварийной ситуации от i -го источника (фактора).

Для оценки отдельных состояний и процессов формулировка вероятностей будет различаться. Построение системы вероятностных показателей безопасности имеет самостоятельное значение и должна основываться на моделях безопасности, которые для каждого случая и процесса различны.

Так, например, вероятность спасения экипажа при оставлении судна можно определить показателем

$$P_{\text{спэ}} = P_{\text{спб}} + P_{\text{спАСС}} \cdot (1 - P_{\text{спб}}), \quad (3)$$

где $P_{\text{спб}}$ - вероятность спасения экипажа с использованием судовых спасательных средств индивидуального и коллективного пользования; $P_{\text{спАСС}}$ - вероятность спасения экипажа с помощью средств и сил аварийно-спасательных служб.

При необходимости учета дополнительных факторов (возможность применения бортовых спасательных средств, использование средств поисково-спасательных служб других государств и т.д.) выражение (3) усложнится и примет вид

$$\begin{aligned} P_{\text{спэ}} = & P_{\text{спб}} + (1 - P_{\text{спб}}) \cdot P_{\text{спАСС}} + \\ & + (1 - P_{\text{спб}}) \cdot (1 - P_{\text{спАСС}}) \cdot P_{\text{спИАСС}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_{\text{спИАСС}}$ - вероятность спасения экипажа с помощью средств иностранных спасательных служб.

В более общем виде вероятность, характеризующая безопасность человека на воде, имеет вид

$$P_{\text{бч}} = (1 - P_{\text{ас}}) + P_{\text{ас}} \cdot P_{\text{лас}} + P_{\text{ас}} \cdot (1 - P_{\text{лас}}) \cdot P_{\text{спэ}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{ас}}$ - вероятность возникновения аварийной ситуации; $P_{\text{лас}}$ - вероятность ликвидации или локализации аварийной ситуации; $P_{\text{спэ}}$ - вероятность спасения экипажа.

Заключение

Сформирована структура показателей безопасности водного транспорта, включающая: безопасность транспортных процессов, безопасность системы управления судами, экономическую безопасность, экологическую безопасность, информационную безопасность и антитеррористическую безопасность. При этом каждый из элементов структуры включает от двух до пяти составляющих.

Обсуждены группы критериев безопасности: функциональные, экономические, социальные, экологические и информационные. Установлено, что в качестве основных критериев безопасности водных

транспортных средств выступают: концентрация опасных веществ (экологическая безопасность), уровень шума на судах (экологическая безопасность), уровень аварийности и травматизма (функциональная безопасность), уровень ущерба от аварий и инцидентов на судне (функциональная безопасность) и уровень риска, как интегральный показатель безопасности.

Рассмотрены составляющие безопасности транспортного процесса, в том числе безопасность судна, безопасность водных коммуникаций, безопасность транспортной инфраструктуры, экономическая и экологическая, информационная и террористическая безопасности.

Показано, что причины возникновения технических аварийных ситуаций связаны с

недостатками в организации работы судовых экипажей, их слабой профессиональной подготовкой, с неудовлетворительными действиями береговых служб управления, технического обслуживания и судоремонта. Причины роста аварийности на флоте следует искать в экономических, технических, информационных факторах и, конечно, в человеческом факторе.

Для определения количественных показателей безопасности водного транспортного средства требуется разработка моделей для различных элементов системы в ситуациях, характеризующихся факторами, влияющими на безопасность. При этом для оценки вероятностных характеристик должны учитываться законы распределения случайных величин.

Литература

1. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Управление движением судов на подводных крыльях в нормальных и аварийных ситуациях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-2 (40). С. 127-138.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 185-194.
3. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Степанов И.В. Методологические принципы управления безопасностью региональных транспортных систем. - Санкт-Петербург. ИПА ВУЗ, 2019. - 271 с.
4. Система освидетельствования компаний на соответствие требованиям Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ) ND №2-0801101-002-R-E. Санкт-Петербург. РМРС, 2005. - 317 с.
5. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Стариченков А.Л. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1 (45). С. 20-28.
6. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л. Систематизация экологических факторов среды обитания судового экипажа // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1-1 (51). С. 53-63.
7. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Аксёнов В.А. Оценка экологической эффективности судоходной компании // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 86-91.
8. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта / ред. Д. А. Скороходов. - Санкт-Петербург: ИПА ВУЗ, 2020. - 278 с.
9. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Королёв О.А. Информационная система поддержки принятия решения при борьбе за живучесть судна // в сборнике: «Технологии построения когнитивных транспортных систем» материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 93-99.
10. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 209-214.
11. Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н., Каминский В.Ю. Моделирование действий специалистов водного транспорта методом профессионально-аксиологического анализа механизмов принятия решений // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 183-189.

References

1. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem sudov na podvodnyh kryl'yah v normal'nyh i avarijnyh situacijah [Hydrofoil traffic control in normal and emergency situations] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 2-2 (40). pp. 127-138.
2. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem [Reliability of motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 185-194.
3. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Stepanov I.V. Metodologicheskie principy upravleniya bezopasnost'yu regional'nyh transportnyh system [Methodological principles of safety management of regional transport systems]. Sankt-Peterburg. IPA VUZ, 2019. 271 p.
4. Sistema osvidetel'stvovaniya kompanij na sootvetstvie trebovaniyam Mezhdunarodnogo kodeksa po upravleniyu bezopasnost'yu (MKUB) ND №2-0801101-002-R-E [The system of certification of companies for compliance with the requirements of the International Safety Management Code (ISM Code) ND No. 2-0801101-002-R-E]. Sankt-Peterburg. RMRS, 2005. - 317 p.
5. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem vodoizmeshchayushchih sudov na perekhode morem [Traffic control of displacement vessels at the sea crossing] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-1 (45). pp. 20-28.
6. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L. Sistematzaciya ekologicheskikh faktorov sredy obitaniya sudovogo ekipazha [Systematization of environmental factors of the ship's crew habitat] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 1-1 (51). pp. 53-63.

7. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Aksyonov V.A. Ocenka ekologicheskoy effektivnosti sudohodnoj kompanii [Assessment of the environmental efficiency of a shipping company] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 2-1 (52). pp. 86-91.
8. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Konstruktivnaya bezopasnost' vysokoskorostnogo vodnogo transporta [Structural safety of high-speed water transport] / red. D. A. Skorohodov. Sankt-Peterburg. IPA VUZ, 2020. - 278 pp.
9. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Korolyov O.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri bor'be za zhivuchest' sudna [Information system for decision-making support in the fight for the survivability of the vessel] // v sbornike: «Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem» materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. pp. 93-99.
10. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A. Metodika uchyota professional'no-cennostnogo aspekta dejstvij sudovoditelya vo vremya trenazhyornoj podgotovki [The methodology of taking into account the professional and value aspect of the actions of the skipper during the simulator training] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 209-214.
11. Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N., Kaminsky V.Yu. Modelirovanie dejstvij specialistov vodnogo transporta metodom professional'no-aksiologicheskogo analiza mekhanizmov prinyatiya reshenij [Modeling of actions of water transport specialists by the method of professional axiological analysis of decision-making mechanisms] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). pp. 183-189.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: skorohodda@mail.ru

Сергей Николаевич Турусов, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Акционерное общество «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения» (ВНИТИ ЭМ), 196128, Санкт Петербург, Благодатная ул., д. 2, e-mail: serniktur@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, PhD (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Sergey N. Turusov, professor, Dr.Sci. (Eng), General Director, JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM) 2, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation, e-mail: serniktur@yandex.ru

Поступила в редакцию: 04.07.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

Оценка скорости и сложности алгоритмов спектрального преобразования изображений в системах наблюдения за морскими судами

Ш.С. Фахми^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, С.В. Колесниченко³ e-mail: serjkop@yandex.ru,
Е.В. Костикова³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru, С.А. Селиверстов¹ e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru,
О.В. Бородина¹ e-mail: borodinaov@gmail.com, А.А. Халтурин⁴ e-mail: artyomatwork247@mail.ru,
А.В. Терлеев⁴ e-mail: andrew.terleev@gmail.com

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ⁴Санкт-Петербургский горный университет

Аннотация. Исследуется процесс развития современных систем видеонаблюдения на морском транспорте, а также затронуты некоторые приложения и особенности передачи изображений и способы повышающие ее эффективность. Системы морского наблюдения могут использоваться для повышения безопасности портов, аэропортов, торговых и военных судов, а также для контроля морского движения в портах и каналах, защиты прибрежных и нефтяных платформ. Камеры являются одним из основных датчиков этих систем. Они дешевы и дополняют другие типы датчиков. В данной работе представлены результаты исследований по использованию алгоритма быстрого преобразования Фурье с децимацией во времени при размерности $2^2 \times 2^2$ при обработке морских сюжетов, полученных из различных камер наблюдения за крымским мостом. Предложенный алгоритм получен путем применения двухэтапного подхода к декомпозиции и внедрению эффективной методики группировки поворотных множителей Фурье-преобразования в комплексной форме. Анализируется арифметическая сложность предлагаемого алгоритма и вычисляется количество действительных умножений и сложений для различных размеров преобразования и изображений морских судов. Кроме того, выполнена оценка скорости передачи и сложности обработки морских изображений для различных форматов и разрешений.

Ключевые слова: Видеосистема наблюдения, двумерная фильтрация, морские изображения, алгоритм радикс- 2^2 , скорость и сложность передачи.

Estimation of the bitrate and complexity of spectral image transformation algorithms in marine vessel surveillance systems

Shakeeb S. Fahmi^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, Sergey V. Kolesnichenko³ e-mail: serjkop@yandex.ru,
Elena V. Kostikova³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Svyatoslav A. Seliverstov¹ e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru,
Olga V. Borodina¹ e-mail: borodinaov@gmail.com, Artyom A. Khalturin⁴ e-mail: artyomatwork247@mail.ru,
Andrei V. Terleev⁴ e-mail: andrew.terleev@gmail.com

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, ⁴Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The process of development of modern video surveillance systems in maritime transport is investigated, as well as some applications and features of image transmission and methods that increase its efficiency are touched upon. Maritime surveillance systems can be used to improve the security of ports, airports, commercial and military vessels, as well as to control sea traffic in ports and channels, protect coastal and oil platforms. Cameras are one of the main sensors of these systems. They are cheap and complement other types of sensors. This paper presents the results of research on the use of the fast Fourier transform algorithm with decimation in time at a dimension of $2^2 \times 2^2$ when processing marine scenes obtained from various surveillance cameras for the Crimean bridge. The proposed algorithm is obtained by applying a two-stage approach to decomposition and implementing an effective method for grouping the rotary multipliers of the Fourier transform in a complex form. The arithmetic complexity of the proposed algorithm is analyzed and the number of real multiplications and additions for various sizes of transformation and images of sea vessels is calculated. In addition, the estimation of the transmission speed and complexity of processing marine images for various formats and resolutions was performed.

Keywords: Video surveillance system, two-dimensional filtration, marine images, radix- 2^2 algorithm, transmission speed and complexity.

Введение

Начало XXI века приносит динамичное развитие телекоммуникационных технологий, дающих возможность практического использования мультимедиа практически во всех сферах жизни, в частности на транспорте. Последовательно увеличивающаяся пропускная способность каналов передачи данных обеспечивает быструю передачу изображений и видеопоследовательностей с высоким разрешением. Это позволяет широко

распространять системы для высококачественного наблюдения и передачи видеоинформации, полученной из различных камер в режиме реального времени, с использованием специализированных систем на базе видеоданных, в автомобильном, авиационном и морских системах контроля и принятия решений [1,2].

Поскольку в традиционном приложении для передачи изображений при исследовании морских сюжетов, часто на практике, используется фиксированная степень сжатия, для каждого

изображения выделяется одинаковая скорость сжатия кода. Однако, поскольку информация о каждом изображении в системах морского наблюдения неоднородна, сжатие изображения с большим количеством информации неизбежно приведет к большему искажению, чем сжатие изображения с меньшим количеством информации. Очевидно, что это не эффективный способ передачи видеoinформации с точки зрения важности данных или общего искажения. Поэтому необходимо найти наиболее оптимальный алгоритм, обеспечивающий необходимую битовую скорость передачи, сложности устройства обработки и требуемую точность восстановления сжатых видеоданных. В задаче передачи, и в соответствии с общим ограничением максимальной скорости передачи для каждого изображения необходимо применить оптимальное распределение скорости передачи и сложности алгоритмов обработки для минимизации общего искажения изображений [3,4].

Системы видеонаблюдения в динамических средах являются одной из наиболее актуальных тем исследований в области анализа и передачи видеoinформации по высокоскоростным каналам связи, которой уделяется большое внимание в последнее десятилетие. Морское наблюдение можно определить, как наиболее эффективный механизм контроля всей морской деятельности, обеспечивающая безопасность морского движения, экономику и окружающую среду. Около 80% всей мировой торговли осуществляется морским транспортом. С ростом использования морского транспорта увеличивается число аварий, пиратских нападений, таких видов деятельности, как незаконный оборот запрещенных веществ, террористические нападения в портовых зонах и столкновения между морскими транспортными средствами, главным образом в каналах и вблизи портов и побережий [5-8].

Возросло использование камер в системах морского наблюдения. Камеры необходимы для приёма и формирования видеoinформации, а для

обеспечения полной безопасности трафика движения судов необходимо использовать современные методы и алгоритмы дискретного преобразования сигнала для передачи её в соответствующие центры управления и принятия решений. При этом важнейшими факторами для принятия решения являются высококачественная и своевременная доставка видеoinформации в реальном времени.

1. Постановка задачи исследований

Проблема эффективности современных систем наблюдения заключается в том, что нужно обеспечить баланс между двумя антагонизмами в теории систем передачи: а) высококачественной передачей изображений, характеризующихся нестационарностью сигналов и б) пропускной способностью канала связи.

В общем случае видеосистемы наблюдения для сбора и передачи изображений, несмотря на огромное множество методов, и технологий, применяемых в различных прикладных задачах контроля морских акваторий, имеют в качестве основного направления научных исследований одну из двух возможных целей:

I) выполнение анализа видеoinформации с последующей семантической обработкой: обнаружением объектов интереса, классификацией и распознаванием, пониманием сцены и т.д.;

II) преобразование видеoinформации с целью минимизации битовой скорости и передачи по каналам связи с учетом пропускной способности канала и сохранения качества восстановленных изображений.

Большие информационные емкости визуальных данных особенно заметно проявляются при переходе к цифровому представлению видеoinформации. Поэтому задача сжатия нестационарных изображений морских судов наиболее актуальна с точки зрения проектирования современных устройств наблюдения и обработки видеoinформации, упрощенная модель которой показана на рисунке 1.



Рис. 1. Упрощенная модель видеосистемы наблюдения за морскими судами

Новизна такой модели, заключается в интеграции двух важнейших подсистем передачи и анализа видеoinформации:

Подсистема передачи и анализа, включает три основных компонента: приём, первичная обработка и кодирование видеoinформации для передачи по каналу связи.

Подсистема анализа, включающая три основных компонента: обучение, распознавание и структурирование изображений.

В данной работе акцент сделан на разработку математического аппарата быстрого ДПФ, составляющего ядро подсистемы передачи в составе автоматизированной интеллектуальной морской видеосистемы наблюдения (МВС), а также оценки скорости и сложности алгоритмов реализации ДПФ, позволяющего перевод исходного сигнала изображения из пространственной в спектральную область.

2. Описание алгоритма быстрого ДПФ

Дискретные преобразования играют центральную роль в обработке сигналов. Заслуживающие внимания методы включают тригонометрические преобразования, такие как дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [5], дискретное преобразование Хартли (ДПХ) [5], дискретное косинусное преобразование (ДКП) [6] и дискретное синусоидальное преобразование (ДСП) [6], а также преобразования Хаара и Уолша - Адамарда [7].

Двумерное (2-D) ДПФ играет важную роль в обработке изображений, поскольку оно является эффективным инструментом для многих приложений, включая спектральный анализ, фильтрацию и восстановление 2-D изображений. Одним из наиболее практичных подходов к выполнению 2-D ДПФ является использование алгоритмов векторного радика (VR), подробно рассмотренных в работах Риварда и Харриса и др. [5,6], на основе расширения Кули-Тьюки (один из вариантов быстрого ДПФ для комплексных векторов с размерностью, равной степени двойки) для двумерного преобразования изображений. Для расчета 2-D были предложены многие алгоритмы векторного преобразования; они включают алгоритмы вектор-радика-2x2 (VR-2x2), вектор-радика-4x4 (VR-4x4) [7,8] и БПФ с разделением вектора-радика (SVR) [8], где децимация может выполняться как во времени, так и по частоте. Среди всех алгоритмов векторного базиса VR-2x2 имеет простейшую структуру бабочки и прост в реализации, в то время как алгоритм SVR имеет меньшую вычислительную сложность, но относительно сложную структуру, что затрудняет его реализацию, особенно в конвейерных архитектурах - параллельном выполнении нескольких инструкций процессора. Исследования, проводимые в ИПТ РАН при обработке морских изображений различных форматов и разрешения показали, что арифметическая сложность алгоритма вектор-радика-4x4 близка к сложности алгоритма разделения векторного радика [8]. Поэтому алгоритм VR-4x4, по-видимому, является лучшим компромиссом между вычислительными и структурными сложностями. Однако его главный недостаток заключается в том, что он может

применяться только в том случае, если размер блока данных равен мощности (4x4).

За последние годы был введен новый алгоритм ДПФ, а именно алгоритм, так называемый вектор-радикс-2² или ВР-4 (VR-radix - 2²) [8] и его альтернативные алгоритмы [8,9], для преодоления ограничения длины алгоритма радика-4 при конвейерной реализации ДПФ. Идея, лежащая в основе этого алгоритма, состоит в том, чтобы одновременно обеспечить как простую структуру бабочки, предлагаемую радика-2, так и уменьшенное количество поворотных множителей $\exp(2\pi i(m-1)(j-1)/n)$ (m - номер строки, j - номер столбца), после чего выполняется БПФ порядка $n/2$ над каждым из столбцов.

Традиционный подход, используемый для разработки алгоритма радика-2², включает применение многомерной карты линейной индексации [9]. Этот подход был специально разработан для одного измерения, и его распространение на многомерные преобразования не является простым. Однако существует настоятельная необходимость обобщить этот алгоритм для двух и более высоких измерений при обработке больших объемов визуальных данных, в частности морской видеoinформации. Следовательно, в данной работе предложен новый математический аппарат алгоритма реализации быстрого 2-D ДПФ в комплексной области сигнала с размерностью-2²x2² на основе применения двухэтапной декомпозиции подхода и эффективной методики группировки поворотных множителей. А также выполнено тестирование программ реализации предложенного быстрого алгоритма ДПФ для оценки скорости и сложности кодирования и передачи морских сюжетов.

3. Описание математического аппарата ДПФ

2-D ДПФ блока данных $x(n_1, n_2)$ определяется как:

$$X(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} x(n_1, n_2) W_{N_1}^{n_1 k_1} W_{N_2}^{n_2 k_2} \quad (1)$$

где $0 \leq k_i \leq N_i - 1$ и $W_{N_i} = \exp(-\frac{j2\pi}{N_i})$, $i = 1, 2$. N_i , предполагая, что $N_1=N_2=N$, а N -целая степени 2.

Разработка алгоритма вектор-радикс-2²x2² с использованием метода быстрого ДПФ выполняется в два этапа.

На первом этапе рассмотрим первые две стадий алгоритма вектор-радикс-2x2. Необходимо осуществить разложение (1) на 4x4-частичные суммы и замена n_1 и n_2 на $(4n_1 + l_1)$ и $(4n_2 + l_2)$ соответственно для $n_1 n_2 = 0, 1, \dots, \frac{N}{4} - 1$ и $l_1, l_2 = 0, 1, 2, 3$ следующим образом:

$$X(k_1, k_2) = \sum_{l_1=0}^3 \sum_{l_2=0}^3 \sum_{n_1=0}^{\frac{N}{4}-1} \sum_{n_2=0}^{\frac{N}{4}-1} x(4n_1 + l_1, 4n_2 + l_2) W_N^{(4n_1+l_1)k_1} W_N^{(4n_2+l_2)k_2} \quad (2)$$

В соответствии с (2) входной блок $x(n_1, n_2)$ разбивается на 4x4 набора, так что каждая частичная сумма представляет собой 2-D ДПФ размером $\frac{N}{4} \times \frac{N}{4}$. Выходной блок $X(k_1, k_2)$ вычисляется как 4x4 отдельных части, и каждая часть, обозначаемая $X(k_1 + A_1 \frac{N}{4}, k_2 + A_2 \frac{N}{4})$, имеет последовательные блоки

$\frac{N}{4} \times \frac{N}{4}$, индексируемые k_1 и k_2 для $k_1 k_2 = 0, 1, \dots, \frac{N}{4} - 1$ и $\gamma_1 \gamma_2 = 0, 1, 2, 3$. Поэтому (2) можно записать как:

$$X(k_1 + \frac{N}{4} \gamma_1, k_2 + \frac{N}{4} \gamma_2) = \sum_{l_1=0}^3 \sum_{l_2=0}^3 \sum_{n_1=0}^{\frac{N}{4}-1} \sum_{n_2=0}^{\frac{N}{4}-1} x(4n_1 + l_1, 4n_2 + l_2) W_N^{(4n_1+l_1)(k_1+\frac{N}{4}\gamma_1)} W_N^{(4n_2+l_2)(k_2+\frac{N}{4}\gamma_2)}. \quad (3)$$

Составной коэффициент ДПФ, приведенный в (3), может быть разложен следующим образом:

$$W_N^{(4n_1+l_1)(k_1+\frac{N}{4}\gamma_1)} W_N^{(4n_2+l_2)(k_2+\frac{N}{4}\gamma_2)} = W_N^{\frac{N}{4}(l_1\gamma_1+l_2\gamma_2)} W_N^{(l_1k_1+l_2k_2)} W_N^{\frac{N}{4}(n_1k_1+n_2k_2)} = (-j)^{(l_1\gamma_1+l_2\gamma_2)} W_N^{(l_1k_1+l_2k_2)} W_N^{\frac{N}{4}(n_1k_1+n_2k_2)}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим:

$$X(k_1 + \frac{N}{4} \gamma_1, k_2 + \frac{N}{4} \gamma_2) = \sum_{l_1=0}^3 \sum_{l_2=0}^3 (-j)^{(l_1\gamma_1+l_2\gamma_2)} P_{l_1 l_2}(k_1, k_2) W_N^{(l_1k_1+l_2k_2)}, \quad (5)$$

где $P_{l_1 l_2}(k_1, k_2)$ - 2D-DFT размера $\frac{N}{4} \times \frac{N}{4}$, заданный как:

$$P_{l_1 l_2}(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{\frac{N}{4}-1} \sum_{n_2=0}^{\frac{N}{4}-1} x(4n_1 + l_1, 4n_2 + l_2) W_N^{\frac{N}{4}(n_1k_1+n_2k_2)} \quad (6)$$

На втором этапе, чтобы гарантировать, что выходной блок $X(k_1, k_2)$ находится в простом битовом обратном порядке, местоположения промежуточных поворотных множителей, заданных (5), должны быть взаимозаменяемы [9]. Это достигается путем изменения индексов l_1, l_2, γ_1 и γ_2 на $\alpha, \beta, \bar{\alpha}$ и $\bar{\beta}$ соответственно с использованием следующей порядок индексов:

$$\begin{aligned} l_1 l_2 &= \{\alpha\beta, \bar{\alpha}\beta, \alpha\bar{\beta}, \bar{\alpha}\bar{\beta}\} \\ \alpha\beta &= \{00, 10, 10, 11\}; \bar{\alpha} = \alpha + 2; \bar{\beta} = \beta + 2. \quad (7) \\ \gamma_1 \gamma_2 &= \{ab, \bar{a}b, a\bar{b}, \bar{a}\bar{b}\} \\ ab &= \{00, 20, 02, 22\}; \bar{a} = \alpha + 1; \bar{b} = b + 1. \quad (8) \end{aligned}$$

Используя (7) и (8), четыре переменные A, B, C и D определяются как:

$$A_{ab}^{\alpha\beta} = P_{ab}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \beta k_2} + P_{\bar{a}\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \bar{\beta} k_2} + P_{a\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \beta k_2} + P_{\bar{a}b}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \bar{\beta} k_2} \quad (9)$$

$$A_{ab}^{\alpha\beta} = P_{ab}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \beta k_2} + P_{\bar{a}\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \bar{\beta} k_2} - P_{a\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \beta k_2} - P_{\bar{a}b}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \bar{\beta} k_2} \quad (10)$$

$$A_{ab}^{\alpha\beta} = P_{ab}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \beta k_2} - P_{\bar{a}\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \bar{\beta} k_2} + P_{a\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \beta k_2} - P_{\bar{a}b}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \bar{\beta} k_2} \quad (11)$$

$$A_{ab}^{\alpha\beta} = P_{ab}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \beta k_2} - P_{\bar{a}\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\alpha k_1 + \bar{\beta} k_2} - P_{a\bar{b}}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \beta k_2} + P_{\bar{a}b}(k_1, k_2) W_N^{\bar{\alpha} k_1 + \bar{\beta} k_2} \quad (12)$$

Подставляя (9)-(12) в (5), разложения предлагаемого алгоритма векторного радикаса- $2^2 \times 2^2$ можно записать в виде:

1) Для четного-четного разложения:

$$X(k_1, k_2) = A_{00}^{00} - A_{20}^{10} - A_{02}^{01} + A_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{2}, k_2) = A_{00}^{00} - A_{20}^{10} - A_{02}^{01} + A_{22}^{11}$$

$$X(k_1, k_2 + \frac{N}{2}) = A_{00}^{00} - A_{20}^{10} - A_{02}^{01} + A_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{2}, k_2 + \frac{N}{2}) = A_{00}^{00} - A_{20}^{10} - A_{02}^{01} + A_{22}^{11} \quad (13)$$

2) Для нечетно-четного разложения

$$X(k_1 + \frac{N}{4}, k_2) = B_{00}^{00} - jB_{20}^{10} + B_{02}^{01} - jB_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{3N}{4}, k_2) = B_{00}^{00} + jB_{20}^{10} + B_{02}^{01} + jB_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{4}, k_2 + \frac{N}{2}) = B_{00}^{00} - jB_{20}^{10} - B_{02}^{01} + B_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{3N}{4}, k_2 + \frac{N}{2}) = B_{00}^{00} + jB_{20}^{10} - B_{02}^{01} - jB_{22}^{11} \quad (14)$$

3) Для четно-нечетного разложения

$$X(k_1, k_2 + \frac{N}{4}) = C_{00}^{00} + C_{20}^{10} - jC_{02}^{01} - jC_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{2}, k_2 + \frac{N}{4}) = C_{00}^{00} - C_{20}^{10} - jC_{02}^{01} + jC_{22}^{11}$$

$$X(k_1, k_2 + \frac{3N}{4}) = C_{00}^{00} + C_{20}^{10} + jC_{02}^{01} + jC_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{2}, k_2 + \frac{3N}{4}) = C_{00}^{00} - C_{20}^{10} + jC_{02}^{01} - jC_{22}^{11} \quad (15)$$

4) Для нечетного разложения

$$X(k_1 + \frac{N}{4}, k_2 + \frac{N}{4}) = D_{00}^{00} - jD_{20}^{10} - jD_{02}^{01} - D_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{3N}{4}, k_2 + \frac{N}{4}) = D_{00}^{00} + jD_{20}^{10} - jD_{02}^{01} + D_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{N}{4}, k_2 + \frac{3N}{4}) = D_{00}^{00} - jD_{20}^{10} + jD_{02}^{01} + D_{22}^{11}$$

$$X(k_1 + \frac{3N}{4}, k_2 + \frac{3N}{4}) = D_{00}^{00} + jD_{20}^{10} + jD_{02}^{01} - D_{22}^{11} \quad (16)$$

Разложения (13)-(16) могут быть идентифицированы как 2-D ДПФ $\frac{N}{4} \times \frac{N}{4}$ -точечные. Эти соотношения составляют основу предлагаемого векторного алгоритма радикаса- $2^2 \times 2^2$ DIT.

4. Оценка скорости и сложности алгоритмов преобразования

Пусть $M(N, N)$ и $A(N, N)$ -количество действительных умножений и действительных сложений, соответственно, требуемых для вычисления 2-D ДПФ с использованием предложенного алгоритма быстрого ДПФ на основе вектор-радикаса- $2^2 \times 2^2$. Общее количество действительных сложений и умножений после удаления всех тривиальных операций, которые

включают умножение на (± 1) и $(\pm j)$, и умножение на $(1 \pm j) / \sqrt{2}$, для которого требуется только два действительных умножения и два действительных сложения.

Принимая во внимание все эти сокращения и учитывая схему четырех действительных умножений и двух действительных сложений для одного сложного умножения, общее количество действительных умножений, требуемых предлагаемым алгоритмом, составляет:

$$M(N, N) = 16A\left(\frac{N}{4}, \frac{N}{4}\right) + \frac{15}{4}N^2 - 12N, \quad (17)$$

и общее количество реальных сложений составляет:

$$A(N, N) = 16A\left(\frac{N}{4}, \frac{N}{4}\right) + \frac{79}{8}N^2 - 4N. \quad (18)$$

Вычислительные сложности в (17) и (18) являются рекурсивными. Чтобы получить сложность для различных размеров преобразования,

необходимы начальные значения для этих уравнений. В этом случае начальными значениями может быть количество операций, необходимых для размеров 4×4 и 8×8 , где необходимо принять во внимание значения $M(4,4)=0$, $A(4,4)=128$ и $M(8,8)=48$, $A(8,8)=816$. В таблице 1 указано количество действительных умножений и сложений на единицу. Было проведено сравнение между предлагаемыми алгоритмами вектор-радикс - $2^2 \times 2^2$, вектор-радикс- 2×2 и вектор-радикс с разделением векторов с точки зрения общего числа реальных умножений и сложений, как показано на рис. 2. Результаты этого сравнения показывают, что разработанный алгоритм имеет значительно меньше реальных умножений и сложений по сравнению с алгоритмом вектор-радикс - 2×2 .

Таблица 1.

Вычислительная сложность алгоритма ВЕКТОР - RADIX - $2^2 \times 2^2$ для 2-D ДПФ с использованием 4-кратной и 2-кратной схемы добавления

Размерность матрицы	VR- $2^2 \times 2^2$ алгоритма 2-D ДПФ	
	Mults/poin	Adds/point
$N \times N^2$		
$2^2 \times 2^2$	0	9
$2^3 \times 2^3$	2	14
$2^4 \times 2^4$	5	19
...
$2^{10} \times 2^{10}$	15	49

В качестве исходных данных для проведения экспериментов также были использованы видеосъемки движения морских судов через крымский мост (рис. 2) и получены результаты обработки при фиксированных значениях коэффициента сжатия (до 30, от 50 до 80 и от 90 до 150 раз).

А также были проведены исследования по тестированию предложенного быстрого ДПФ над различными изображениями (изображения № 1-5 рис. 2) при заданном фиксированном коэффициенте сжатия с целью определения битовой скорости (BRt) передачи сжатых визуальных данных с учетом пропускной способности канала связи и сложности алгоритма (W- число операции на один пиксель).

Битовая скорость (Битрейт от англ. *bitrate*) — определяется, как количество бит, необходимых для передачи/обработки визуальных данных за единицу времени. Битовая скорость принято минимизировать при передаче больших объемов видеоинформации с учетом пропускной способности канала.

Чем больше пропускной способности канала, тем выше битовой скорости и тем больше числа бит на пиксель можно передавать по каналу, который сможет пропустить этот поток без задержек. Битовая скорость выражается в битах на пиксель (бит/пиксель, BRt) [10].

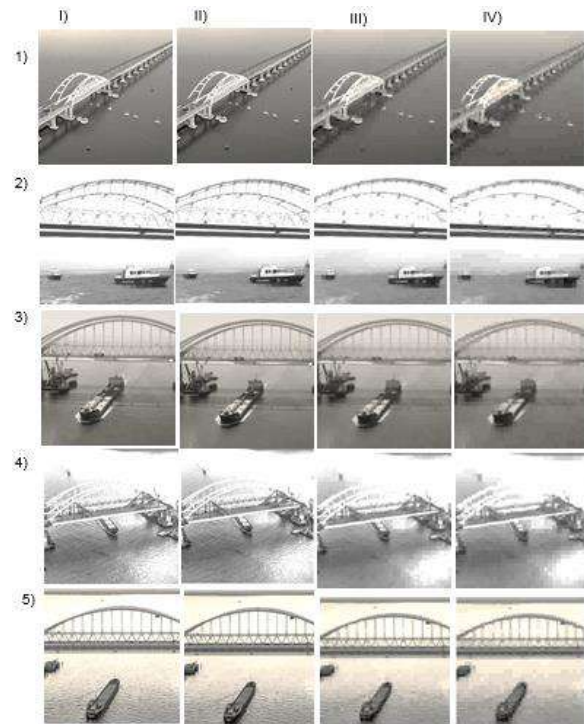


Рис. 2. Сжатие изображения морского судна под крымским мостом: I) исходное изображение, II) сжатие в 30 раз, III) сжатие в 80 раз и IV) сжатие в 150 раз

Известно из теории информации, что:

- сложность устройств обработки видео увеличивается с ростом времени обработки (T) (для наилучших способов, приближенно линейной с T);

- вероятность ошибочного кодирования (P) убывает с ростом T при фиксированной битовой скорости (R);

- T должно возрастать вместе с ростом R для достижения фиксированного значения P; следовательно, имеется обменное соотношение между сложностью и скоростью передачи и точностью восстановления сжатых видеоданных. Чем ближе R к пропускной способности канала и чем меньше P, тем требуется большая сложность устройств обработки морских сюжетов.

Результаты исследований по оценке скорости передачи и сложности устройств кодирования (рис. 3) показали, что имеется следующая корреляционная взаимосвязь: Чем больше сложности кодирующих устройств, тем меньше битовой скорости, т.е. больше коэффициента сжатия и, наоборот, чем больше битовой скорости передачи, тем меньше расхода числа операций на каждый пиксель исходного изображения.

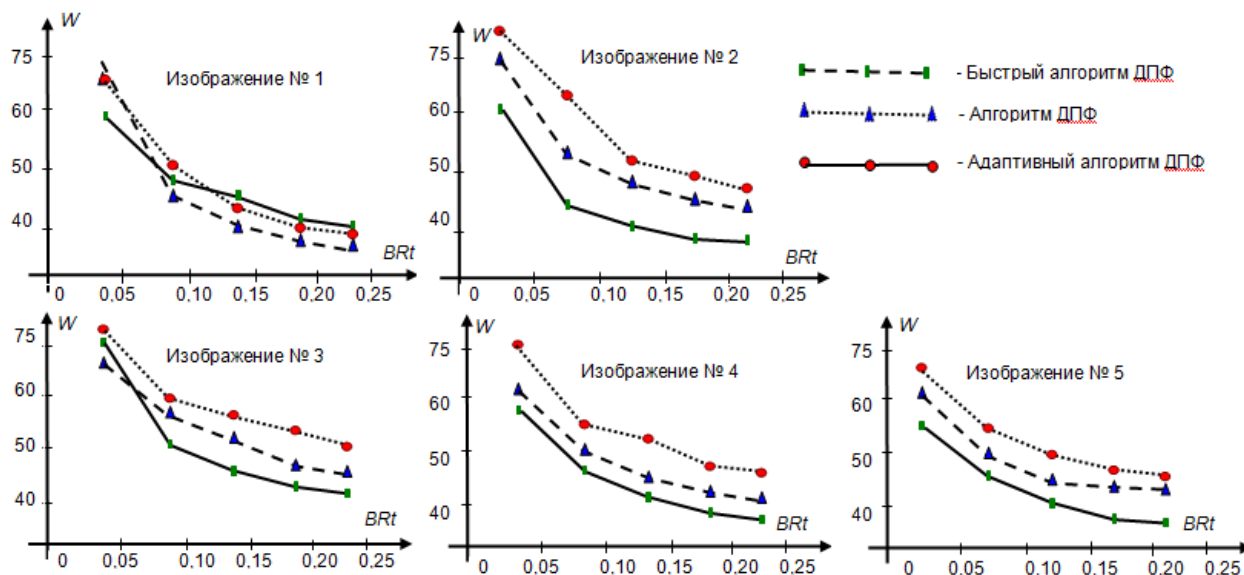


Рис. 3. Оценка битовой скорости (BRt) передачи и сложности (W) алгоритмов преобразования морских изображений (1-5 из рис. 2)

Заключение

В качестве исходных данных для проведения экспериментов были использованы видеосъемки движения морских судов через крымский мост.

В ходе проводимых исследований был протестирован алгоритм быстрого преобразования Фурье векторного радикала, известный как алгоритм VR_{2²×2²} для при обработке различных морских сюжетов, полученных из различных камер наблюдения за крымским мостом.

В результате сравнения показано, что VR_{2²×2²} имеет значительно меньше арифметических операций, чем эквивалентный VR_{2×2}, где была достигнута экономия в размере 25-35% от общего числа умножений и 10-15% от общего числа сложений.

Разработанный алгоритм реализован методом децимации во времени, его вычислительная сложность была проанализирована и сопоставлена

со скоростью передачи сжатых визуальных данных для различных алгоритмов: классическим Фурье преобразованием, адаптивным и быстрым преобразованием. Полученные графики сравнения выше указанных трех алгоритмов показали, что лучшие значения по скорости и сложности дали алгоритмы, сочетающие в себе быстрые алгоритмы с адаптацией к сюжетам.

Применение разработанного алгоритма быстрого преобразования в устройствах обработки видеoinформации морской интеллектуальной транспортной системы [11, 12] способно повысить эффективность и качество ее функционирования наряду с существующими перспективными разработками [13, 14]. А также позволяет ускорить интеллектуализацию разнородных функциональных процессов в системах комплексного мониторинга, при оптимизации вычислительных ресурсов, вплотную подводя к реализации некоторых аспектов когнитивной парадигмы интеллектуального управления транспортной системы.

Литература

1. Малыгин И.Г., Сильников М.В. Интеллектуальные системы транспортной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 1 (29). С. 6-13.
2. Фахми Ш.С., Королёв О.А., Крылов Ю.Е., Костикова Е.В. Модифицированный маршрут проектирования транспортных видеосистем на кристалле // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 2-1 (48). С. 152-159.
3. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Королев О.А. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой промышленной революции // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 8. С. 3-12
4. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов С.А., Хасан Я.А., Абдулджаббар Н.Т.М., Иванов А.В. Гибридный метод преобразования изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 121-131.
5. G. Rivard, "Direct fast Fourier transform of bivariate functions," IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing., vol. 25, pp. 250-252, 1977.
6. D. Harris, 1. McClellan, D. Chan, and H. Schuessler, "Vector radix fast Fourier transform," in IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 77., 1977, pp. 548-551.
7. Wu, H. R., & Paoloni, F. J. (1989). The structure of vector radix fast Fourier transforms. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37(9), 1415-1424. doi:10.1109/29.31295
8. Mounir Hamood, Said Boussakta. Vector-radix-22×22 fast Fourier transform algorithm// Conference: Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010 DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724617. 2010 IEEE.

9. C. Burrus, "Index mappings for multidimensional formulation of the DFT and convolution," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing., vol. 25, pp. 239-242, 1977.
10. Галлагер Р. Теория информации и надёжная связь. – М.: Сов. радио, 1974. –720 с.
11. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Титов В.О., Выдрин Е.О., Гуляевский С.Е., Ващук А.Э. Разработка структурной схемы морской интеллектуальной транспортной системы арктического региона // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-1 (47). С. 84-98.
12. Сазанов А.М., Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Асаул М.А., Титов В.О., Ващук А.Э., Буров И.А. О разработке интеллектуальной системы видеомониторинга морского пространства арктического региона // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 116-128.
13. Костикова Е.В., Фахми Ш.С., Хасан Я.А.А., Селиверстов С.А., Соболев А.В., Подопригра Н.В. Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 2-1 (48). С. 142-151.
14. Фахми Ш.С., Селиверстов С.А., Вислогузов В.В., Крымский В.В. Метод пороговой сегментации изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 69-78.

References

1. Malygin I.G., Sil'nikov M.V. Intellektual'nye sistemy transportnoj bezopasnosti [Intelligent transport security systems]// Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2014. № 1 (29). S. 6-13.
2. Fahmi SH.S., Korolyov O.A., Krylov YU.E., Kostikova E.V. Modificirovannyj marshrut proektirovaniya transportnyh videosistem na kristalle [Modified route design for transport video systems on chip]//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 2-1 (48). S. 152-159.
3. Malygin I.G., Komashinskij V.I., Korolev O.A. Informacionno-upravlyayushchie sistemy vodnogo transporta v period chetvertoj industrial'noj revolyucii [Information and control systems of water transport in the period of the fourth industrial revolution]// Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2017. № 8. S. 3-12.
4. Fahmi SH.S., Shatalova N.V., Seliverstov S.A., Hasan YA.A., Abduldzhabbar N.T.M., Ivanov A.V. Gibridnyj metod preobrazovaniya izobrazhenij morskikh sudov [Hybrid method of converting images of marine vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-3 (45). S. 121-131.
5. G. Rivard, "Direct fast Fourier transform of bivariate functions," IEEE ransactions on Acoustics, Speech and Signal Processing., vol. 25, pp. 250-252, 1977.
6. D. Harris, 1. McClellan, D. Chan, and H. Schuessler, "Vector radix fast Fourier transform," in IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 77., 1977, pp. 548-551.
7. Wu, H. R., & Paoloni, F. J. (1989). The structure of vector radix fast Fourier transforms. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37(9), 1415–1424. doi:10.1109/29.31295
8. Mounir Hamood, Said Boussakta. Vector-radix-22x22 fast Fourier transform algorithm// Conference: Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010 DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724617. 2010 IEEE.
9. C. Burrus, "Index mappings for multidimensional formulation of the DFT and convolution," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing., vol. 25, pp. 239-242, 1977.
10. Gallager R. Teoriya informacii i nadozhnaya svyaz'. [Information theory and reliable communication] – М.: Sov. radio, 1974. –720 s.
11. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Titov V.O., Vydrina E.O., Gulyaevskij S.E., Vashchuk A.E. Razrabotka strukturnoj skhemy morskoy intellektual'noj transportnoj sistemy arkticheskogo regiona [Development of the structural scheme of the marine intelligent transport system of the arctic region] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 1-1 (47). S. 84-98.
12. Sazanov A.M., Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Asaul M.A., Titov V.O., Vashchuk A.E., Burov I.A. O razrabotke intellektual'noj sistemy videomonitoringa morskogo prostranstva arkticheskogo regiona [About the development of an intelligent video monitoring system of the arctic region maritime space] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). S. 116-128.
13. Kostikova E.V., Fahmi SH.S., Hasan YA.A.A., Seliverstov S.A., Sobolev A.V., Podoprigora N.V. Adaptivnoe spektral'noe kodirovanie izobrazhenij v sistemah videonablyudeniya [The fast algorithm of spectral transformation of images in video surveillance systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 2-1 (48). S. 142-151.
14. Fahmi SH.S., Seliverstov S.A., Visloguzov V.V., Krymskij V.V. Metod porogovoj segmentacii izobrazhenij morskikh sudov [The threshold segmentation method of sea ships images] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-2 (46). S. 69-78.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: shakeebf@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi, Dr. Sci. (Eng), associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Leading researcher at the Institute of transport problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12 Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: shakeebf@mail.ru

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Тел.: +(812) 748-96-45, м.т. 768, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Сергей Викторович Колесниченко, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой математического моделирования и прикладной информатики ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д.5/7. e-mail: serjkop@yandex.ru

Святослав Александрович Селиверстов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Ольга Владимировна Бородина, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: borodinaov@gmail.com

Артём Алексеевич Халтурин, аспирант 2-ого года обучения кафедры «Электроэнергетики и электромеханики» Санкт-Петербургского горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. e-mail: artyomatwork247@mail.ru

Андрей Викторович Терлеев, аспирант кафедры Электроэнергетики и Электромеханики, Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. e-mail: andrew.terleev@gmail.com

Elena V. Kostikova, PhD (Eng), associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, St.Petersburg, 198035, Russian Federation. e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Sergey V. Kolesnichenko, Dr. Sci. (Eng), associate Professor, head of the department of of Mathematical Modeling and Applied Computer Science, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 5/7 Dvinskaya street, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation. e-mail: serjkop@yandex.ru

Svyatoslav A. Seliverstov, Phd (Eng), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: borodinaov@gmail.com

Artyom A. Khalturin, postgraduate student of the 2nd year of Electroenergetics and Electromechanics Department in Saint-Petersburg Mining University. 2, 21st line of Vasilevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation. e-mail: artyomatwork247@mail.ru

Andrei V. Terleev, postgraduate student of the Electrical Power Engineering and Electromechanics Department, 2, 21st line of Vasilevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation. e-mail: andrew.terleev@gmail.com

Поступила в редакцию: 24.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.021>

Многопроцессорная система обнаружения и слежения за морскими судами на базе технологии «система на кристалле»

Ш.С. Фахми^{1,2}, e-mail: shakeebf@mail.ru, Н.В. Шаталова¹, e-mail: shatillen@mail.ru,

Е.В. Костикова³, e-mail: kostikova.ev@mail.ru, С.В. Колесниченко³, e-mail: serjkop@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Транспортные интеллектуальные видеосистемы наблюдения, включающие в свой состав умные камеры с функциями анализа видеоинформации для обеспечения безопасности транспорта, в том числе и морских объектов, представляют собой наиболее востребованные системы, синтезируемые на базе субмикронных технологий. При этом важнейшая особенность таких систем заключается в автоматизированной обработке и анализе видеоинформации, полученной от различных камер наблюдения. Определена базовая концепция обнаружения и слежения за объектами на основе применения метода формирования опорных векторов. Применение технологии «система на кристалле» позволяет оперативно обнаружить подозрительное поведение объектов, на основе встроенных интеллектуальных сложно-функциональных блоков, входящих в состав предложенной транспортной интеллектуальной видеосистемы. В данном исследовании предлагается конкретная архитектура системы видеонаблюдения на базе программируемой многопроцессорной системы с аппаратным ускорителем основных вычислений. В состав видеосистемы наблюдения входит схема аппаратного ускорителя формирования опорных векторов, составленная классификационной частью с использованием внутренней памяти. Экспериментальный раздел показывает возможность реализации предлагаемой системы с точки зрения производительности и потребляемых ресурсов на базе программируемых схем. Рассматривается реализация системы видеонаблюдения с использованием гибридной архитектуры на базе мультипроцессора и формирования опорных векторов на базе аппаратного ускорителя.

Ключевые слова: видеосистема наблюдения, морские суда, ПЛИС, архитектура видеосистемы, обнаружение, слежение, субмикронные технологии.

Multiprocessor system for detecting and tracking marine vessels based on the "system on chip" technology

Shakeeb S. Fahmi^{1,2}, e-mail: shakeebf@mail.ru, Natalia V. Shatalova¹, e-mail: shatillen@mail.ru,

Elena V. Kostikova³, e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Sergey V. Kolesnichenko³, e-mail: serjkop@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Transport intelligent video surveillance systems, which include smart cameras with video information analysis functions to ensure the safety of transport, including marine objects, are the most popular systems synthesized on the basis of submicron technologies. At the same time, the most important feature of such systems is the automated processing and analysis of video information obtained from various surveillance cameras. Basic concept of object detection and tracking is defined based on application of method of reference vectors formation. The use of the "system on chip" technology allows you to quickly detect suspicious behavior of objects, based on the built-in intelligent complex-functional blocks that are part of the proposed transport intelligent video system. In this paper, we propose a specific architecture of a video surveillance system based on a programmable multiprocessor system with a hardware accelerator for basic computing. The video surveillance system includes a circuit of a hardware accelerator for generating reference vectors, compiled by a classification part using internal memory. The experimental section shows the possibility of implementing the proposed system in terms of performance and resource consumption based on programmable circuits FPGA. Implementation of video surveillance system using hybrid architecture based on multiprocessor and formation of reference vectors based on hardware accelerator is considered.

Keywords: Video surveillance system, marine vessels, FPGA, video system architecture, detection, tracking, submicron technologies.

Введение

Интеллектуальное видеонаблюдение, как решение проблемы безопасности, представляет собой видеосистему, реализующую современные методы слежения, распознавания и классификации объектов интереса в различных областях и сферах деятельности человека.

Автоматизированная система видеонаблюдения за объектами, в частности за морскими судами, с подозрительным поведением, представляет большую проблему для сотрудников диспетчерских

центров по контролю безопасности и регулированию движения судов. При этом решение задачи обнаружения и слежения является трудоемким и представляет собой сложный процесс, требующий огромные вычислительные ресурсы [1,2].

Современные видеосистемы обнаружения и слежения (ВСО) за объектами изображений в основном строятся на базе микропроцессорных модулей, которые характеризуются низкой стоимостью, небольшими габаритами и малым потреблением энергии, высокой надежностью и высокой агрегатной способностью. Главными

средствами достижения высокой производительности, определяющими построение ВСО, являются распараллеливание процессов вычисления и использования современных многопроцессорных систем с реконфигурируемой логикой.

Для внедрения интеллектуальных видеоинформационных систем важнейшим ограничением, используемым при синтезе систем обнаружения и слежения за объектами в акваториях и прибрежных водах, является сложность ВСО [3,4]. При этом возникает проблема поиска методов обработки искажённых шумом нестационарных источников морских сюжетов, обеспечивающих наилучшее согласование передачи изображений с каналом связи, т. е. наилучшее информационное равновесие системы связи (равенству энтропии и пропускной способности канала) при учёте ограничения сложности кодера источника.

Современный уровень полупроводниковой технологии, позволяющий размещать на одном кристалле более миллиарда вентилях (с возможностью реализовывать на кристалле одновременно аналоговые блоки, процессоры, программируемую и цифровую логику и т. д.) определил революционные изменения в микроэлектронике и в целом индустрии интеллектуальных видеосистем наблюдения, с использованием новой базы программируемой вычислительной техники.

Противоречие между желанием и возможностями применения технологии «система на кристалле» в специализированных видеосистемах наблюдения и, в частности, для обнаружения и слежения за морскими судами вызвало к жизни концепцию программирования структур на базе многопроцессорных систем. Благодаря программированию структур в электронной промышленности произошла универсализация схем и появился новый подход в проектировании на системном уровне, заключающийся в повторном использовании стандартных сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) при проектировании видеосистем на кристалле [5,6].

1. Постановка задачи исследований

В настоящее время, безопасность морского пространства и, в частности морских акваторий, обусловлена обеспечением различными современными видеосистемами обнаружения и распознавания. Эти видеосистемы чаще контролируются диспетчерскими центрами контроля безопасности. При этом основной целью видеосистемы наблюдения является выявление чрезвычайных ситуаций (ЧС), например, подозрительного или опасного поведения, такого как нарушение траектории, возможность столкновения, аварии и т.д. [7]. По определению, ЧС представляет собой подозрительное поведение, которое может по-разному угрожать человеческой жизни. В данной работе рассматриваются три основных этапа обнаружения и распознавания ЧС (рис. 1): обнаружение объектов, отслеживание и исследование поведения (определение признаков объектов и принятие решения).



Рис. 1. Структурная схема: а) СФ-блока обнаружения и б) слежения

1) Первая задача заключалась в определении моделей для распознавания подозрительного поведения. Аномальное поведение не представляет собой простое действие, но оно определяется некоторыми простыми действиями, которые в сумме представляют собой сложное поведение. Поэтому подозрительное поведение не имеет стандартного шаблона, и фаза распознавания оспаривается точностью обнаружения ЧС.

2) Обнаружение объекта представляет собой первый шаг в системе распознавания подозрительного поведения, от которой зависит вся система, чтобы улучшить скорость распознавания. Для обнаружения объектов используется сравнение основных методов вычитания фона. Затем шаг отслеживания необходим для определения траектории или типа поведения. В литературе используется несколько алгоритмов, но результаты не всегда удовлетворительны [8].

Данная статья посвящена разработке ВСО, обеспечивающей обнаружение и распознавание объектов в реальном времени на основе технологии «система на кристалле». Обнаружение выполняется путем исследования видеoinформации, полученной из различных камер наблюдения за морскими судами. Второй проблемой была разработка системы наблюдения с использованием современной элементной базы вычислительной техники. Известно, что обработка видеоизображений требует определенной архитектуры для получения результатов в реальном времени.

Следует отметить, что существующие системы наблюдения характеризуются несколькими проблемами:

1) наиболее традиционный метод наблюдения основан на ручном/визуальном обнаружении [9];

2) большая часть сегодняшнего наблюдения не используется для предотвращения аварий, а используется только для идентификации того, что уже произошло [10];

3) большинство систем наблюдения не обнаруживают подозрительного поведения в режиме реального времени. Эта проблема обусловлена сложностью алгоритма [10];

4) отсутствие современной технологии с использованием программируемых процессорных модулей;

5) отсутствие функций аналитики для создания интеллектуальных видеосистем наблюдения.

На основе выше сказанного, внесены два предложения:

1) введение в состав ВСО СФ-блока обнаружения и слежения;

2) применение программируемой многопроцессорной системы.

В данном исследовании приводится решение задачи проектирования ВСО и оно включает: разработку на системном уровне, распределение аппаратных и программных ресурсов и разработку

архитектуры на базе схем с репрограммируемой логикой.

Предложены структурные решения на основе реконфигурируемой архитектуры для построения ВСО на базе многопроцессорной системы на кристалле, которые позволяют ускорить обработку видеoinформации и получить результаты обнаружения и распознавания морских судов в реальном времени. А также показаны результаты экспериментальных исследований по аппаратной реализации предлагаемой видеосистемы с точки зрения вычислительных затрат, производительности и стоимости.

2. Этапы проектирования ВСО

Процесс проектирования ВСО можно разложить на пять этапов [5]:

- 1) разработка алгоритмов обнаружения и слежения за морскими судами;
- 2) исследование возможности распараллеливания алгоритмов функционирования системы и разработка параллельных алгоритмов обнаружения и распознавания;
- 3) разработка структурных и функциональных схем реализации на основе технологии «система на кристалле»;
- 4) определение программно-аппаратных расходов;
- 5) расчет производительности ВСО.

Часто на практике выполнение любого из выше перечисленных этапов оказывает непосредственное влияние на остальные этапы.

Определение и исследование структурной организации ВСО базируется на разработанных ранее параллельных алгоритмах обнаружения и слежения.

Информационные и управляющие потоки в параллельных алгоритмах подсказывают необходимую структуру процесса вычисления. С другой стороны, для проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем наблюдения необходимо наглядно и точно представить процессы протекания информационных потоков. Следовательно, разработку требуемой видеосистемы нужно выполнять, начиная с исследования информационных связей, формирующих потоки данных и команд для корректного и правильного выбора соответствующей структуры [5].

Основные базовые схемы взаимодействия компонентов видеосистем классифицированы и изложены в работе [5].

Наиболее очевидным представляется выбор требуемой структурной схемы видеосистем наблюдения с использованием многопроцессорной архитектуры, так как данные структуры обеспечивают возможность образования необходимого числа параллельно работающих элементарных процессоров (ЭП) и точно отображают систему каналов связи при доступе к общему ресурсу системы – памяти изображений (рис. 2).

3. Базовая концепция обнаружения и слежения за объектами

Обнаружение и слежение за объектами является основной целью любой системы видеонаблюдения. Распространённым способом обнаружения является

применение метода формирования опорных векторов (ФОВ).

Этот метод отслеживает любой объект, найденный в фоновом и переднем плане кадра. Полууправляемый классификатор, используемый системой совместного обучения, объединяет функции объекта для обработки нового образца. Этот процесс обеспечивает легкое обнаружение объекта и легкое разделение с фоном [11].

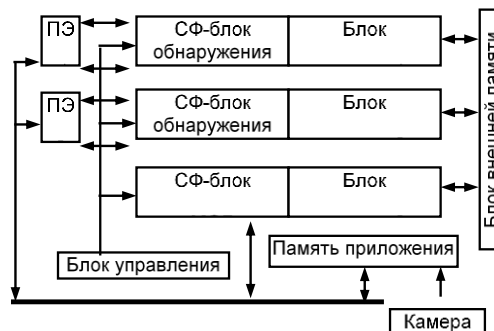


Рис. 2. Структурная схема многопроцессорной видеосистемы обнаружения и слежения за морскими судами

ФОВ - это полная вычислительная процедура, описанная в [12] и [13] с полной детализацией и включает следующие процессы:

- 1) обучение;
- 2) прием входного изображения;
- 3) нормализация;
- 4) классификация;
- 5) фильтрация для уменьшения шума [5].

Уравнение (1) представляет модель алгоритма классификации:

$$\sum \alpha_i k(X_x, X_i) \geq \sum \alpha_i k(X_s, X_i) = \tau,$$

где радиус представлен значением τ .

Вспомогательные векторы, полученные на этапе обучения, являются X_s и α_i . X_x является входным пикселем. Классификатор сравнивает входной пиксель со всеми опорными векторами. Затем он определяет, принадлежит ли входной пиксель внутренней части сферы. В ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, для реализации были использованы следующие ядра [5,6]:

Полиномиальное: $K(x, x') = ((x, x') + \text{const})^d$.

Радиальная базисная функция:

$$K(x, x') = e^{-\lambda \|x-x'\|^2}, \lambda > 0.$$

Гауссова радиальная базисная функция:

$$K(x, x') = e^{-\lambda (\|x-x'\|^2) / 2\sigma^2}.$$

Сигмоид: $K(x, x') = \tanh(k(x, x') + c)$, $k > 0$, $c < 0$.

Где γ - коэффициент распространения ядра.

Алгоритмы ФОВ обеспечивают более высокую точность, чем другие алгоритмы обнаружения и отслеживания.

4. Архитектура видеосистемы наблюдения на основе технологии «система на кристалле»

Предложенная архитектура ВСО использована в различных приложениях: интеллектуальное наблюдение, умные города, умные камеры и т.д. Архитектура, основана на использовании программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), на базе современной платформы и

позволяет осуществить генерацию многопроцессорной системы с гибкой программируемой логикой.

На рис. 2 показана структурная схема предлагаемой аппаратной архитектуры. Конвейерный, многопроцессорный и сложно-функциональный блок (СФ-блок) позволяет обеспечить высокую производительность при выполнении арифметических и логических операций с требуемой точностью вычислений.

Предлагаемая архитектура состоит из трех основных функциональных блоков: а) блока обнаружения объекта, б) блока слежения и в) блока программного обеспечения для слежения за поведением объектов. Первый и второй блоки являются аппаратными СФ-блоками, и они будут реализовываться архитектурой специального назначения (рис. 3). Третий блок - это программное приложение, написанное на языке Си и выполняемое главным процессором СФ-блока контроллера.

Блок контроллера памяти поддерживается внешним интерфейсом памяти DDR2. Он содержит пять портов, три из которых используются для записи, а остальные для чтения. Буферы используются для того, чтобы избежать артефактов кадра.

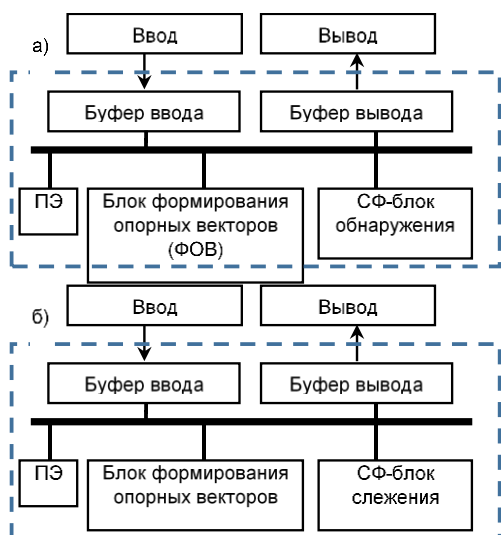


Рис. 3. Структурная схема: а) СФ-блока обнаружения и б) слежения

Блок управления представляет собой основной компонент в предлагаемой конструкции. Он обеспечивает различные услуги:

- делит рамку на три части;
- произвольный доступ процессоров к элементам памяти / из памяти;
- управляет состоянием процессорных элементов: простаивает, останавливает, запускает и работает;
- выполняет прикладной код исследования поведения.

Интернет-интерфейс привязан к компьютеру. Этот интерфейс добавляется для визуализации операций, сохраненных в буфере.

Мультимедийный интерфейс высокой четкости (HDMI) добавляется для вывода на дисплей и проверки точности предлагаемой архитектуры. На рис. 2 показана архитектура ядра. Предлагаемая

архитектура BCO относится к классу: единственный поток команд - множественный поток данных (Single Instruction Multiple Data-SIMD) [12]. Связь между различными компонентами обеспечивается шиной на основе трех сигналов: сигнала управления, сигнала данных и сигнала планирования. Блок планирования управляет срезами по отношению к ядрам. ФОВ_НА - это аппаратный ускоритель.

На рис. 3 показана архитектура обнаружения объектов (а) и слежения (б). Предложен подход MPSoC, основанный на процессорном элементе (PE) в сочетании с аппаратным ускорителем ФОВ. Он направлен на ускорение этапа классификации и учитывает ограничения реального времени. Ядро выполняет основную функцию и сотрудничает с аппаратным ускорителем ФОВ.

Важно отметить, что в состав видеосистемы наблюдения входит схема аппаратного ускорителя ФОВ, составленная классификационной частью с использованием внутренней памяти (рис. 3а), где вспомогательные векторы извлекаются из внешней памяти.

5. Результаты эксперимента

В данном разделе рассматривается реализация системы видеонаблюдения с использованием гибридной архитектуры на базе мультипроцессора и ФОВ на базе аппаратного ускорителя.

Предложенная в предыдущем разделе архитектура реализована на плате Altera DE2-115, показанной на рис. 4. ПЛИС считывает видеопоток с USB-камеры Microsoft LifeCam Studio Q2F-00016 с разрешением 640 x 480 пикселей. Целью данной работы является получение в режиме реального времени выполнения системы видеонаблюдения с использованием двух процессоров NIOS II, аппаратного ускорителя и распределенной памяти.

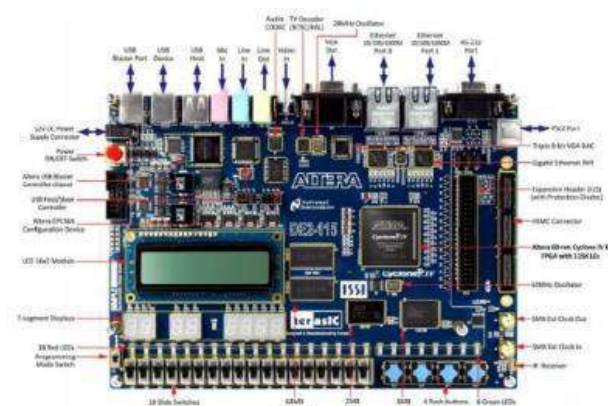


Рис. 4. Аппаратные средства проектирования видеосистем наблюдения

Проектирование объектов обнаружения и слежения было написано на языке описания аппаратного обеспечения VHSL (VHDL) и синтезировано из модели уровня передачи регистров (RTL). Алгоритм исследования поведения написан на языке Си. Затем применяется оптимизация алгоритма для поддержки встроенной модели многопроцессорной системы.

Платформа FPGA включает в себя 32-битный процессор NIOS II, 64 КБ встроенной оперативной памяти (ОЗУ) для буферов и 32 КБ встроенной

оперативной памяти для исследования поведения в качестве программного приложения.

Подводя итог, можно сказать, что разработанный проект включает в себя два программных процессора NIOS II, аппаратный ускоритель и общую память, которые представляют собой ядро проекта. Сигналы управления, передачи данных и планирования обеспечиваются шиной AVALON bus1 (шина на рис. 3). Генератор тактовых импульсов (Clock) процессорного ядра проекта работают на частоте 100 МГц. Шина AVALON работает с тактовой частотой 50 МГц. Контроллер сбора видеосигнала работает на частоте 73,6 МГц, контроллер HDMI - на частоте 25 МГц, а контроллер Ethernet - на частоте 125 МГц.

Потребности в ресурсах для каждого объекта VHDL указаны в табл.1. Элемент цифрового сигнального процессора (ЦСП) является основным типом процессора блока контроллера.

Отчет о занятии ПЛИС доказывает, что выбор конфигурации выбирается в соответствии с конкретными требованиями предлагаемого приложения. Приложение использует 5940 логических элементов внутри ПЛИС. Общее количество битов памяти блоков, предоставляемых платой, равно 21233664. Исходя из результатов, приведенных в табл. 2, при проектировании используется 24% логических элементов на ПЛИС и занято 82% памяти.

Табл. 1.

Расходы ПЛИС

Тип ресурса	Лог. эл.	Общая память (бит)	ЦСП эл.
СФ-блок обнаружения	4752/39600 (12%)	499323/1161216 (43%)	0/252 (0%)
СФ-блок слежения	1188/39600 (3%)	220631/1161216 (19%)	0/252 (0%)
Блок анализа поведения	0/39600 (0%)	232651/1161216 (20%)	58/252 (23%)

Следует отметить, что инструмент Timing Analyzer оценивает производительность системы в реальном времени на основе результатов каждого этапа обработки. Время обработки вычисляется в микросекундах.

Табл. 2.

Расходы видеосистемы наблюдения на ПЛИС

Тип ресурса	Требуемые ресурсы	Процент
Комбинационная логика	101990/424960	24%
Память	17411604/21233664	82%
Регистры	89241/424960	21%
ЦСП эл.	133/1024	1%

Результаты показывают, что общее время обработки составляет около 81,140 мс. Поэтому

предлагаемая система могла бы работать со скоростью 120 кадров в секунду. Эта временная задержка дает большую возможность ускорить время выполнения и обеспечивает обработку в реальном времени.

Исходя из результатов анализа мощности и инструмента оптимизации, вся система расходует 1,448 Вт мощности, где 768 МВт рассеиваются нашей конструкцией. Эта рассеиваемая мощность подавляется контроллером памяти (342 МВт). 426 МВт представляет собой используемую мощность всеми модулями обработки. Общая рассеиваемая мощность (680 МВт), представляет собой полную мощность установки. Она состоит из ПЛИС, физического кристалла, ввода-вывода Ethernet и внешней памяти DDR2.

Заключение

В настоящее время, безопасность морского пространства и, в частности морских акваторий, обусловлена обеспечением различными современными видеосистемами обнаружения и распознавания. Благодаря программированию структур в электронной промышленности произошла универсализация схем, и появился новый подход в проектировании на системном уровне.

В данной статье обобщены различные автоматизированные системы наблюдения, обнаружения и слежения. Предложенная архитектура видеосистемы обнаружения и распознавания морских объектов позволяет осуществить надежное и оперативное обнаружение подозрительного поведения объектов в реальном времени. Архитектура ВСО, основана на использовании программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), на базе современной платформы и позволяет осуществить генерацию многопроцессорной системы с гибкой программируемой логикой.

Авторами предложены различные методы, используемые для ускорения скорости, и предлагается попытка, основанная на данных, управляемых ошибками исправления выходного кодирования классификатор для обеспечения реального времени выполнения.

В экспериментальном разделе была рассмотрена реализация системы видеонаблюдения с использованием гибридной архитектуры на базе мультипроцессора и метода формирования опорных векторов на базе аппаратного ускорителя.

Использование многопроцессорной архитектуры на базе технологии «система на кристалле», а также реализацию блоков обнаружения и слежения в виде отдельных СФ-блоков аппаратных ускорителей в составе видеосистемы позволили достичь высокую производительность в условиях ограничения пропускной способности канала связи.

Литература

1. M. Bramberger, R. P. Pflugfelder, A. Maier, B. Rinner, B. Strobl, and H. Schwabach. A smart camera for traffic surveillance. In Proceedings of the First Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pages 153–164, 2003.
2. W. Wolf, B. Ozer, and T. Lv. Smart cameras as embedded systems. IEEE Computer, 35(9):48–53, September 2002.
3. Фахми Ш.С., Крылов Ю.Е., Хасан Я.А.А., Костикова Е.В. Кодек для передачи морских сюжетов в условиях ограничений канала// Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 164-171.

4. Фахми Ш.С., Бобровский А.И., Соколов Ю.М. Синтез устройств пирамидально-рекурсивного кодирования изображений на сигнальных процессорах// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 1. С. 78-89.
5. Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Шаталова Н.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: Методы и технологии проектирования: Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация ВУЗ, 2020. – 346 с.
6. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В. Костикова Е.В. Многопроцессорная транспортная видеосистема наблюдения на базе технологии «система на кристалле» // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 172-180.
7. Mossaad B., Sabeur El k., Mohamed A. An Automated Surveillance System based on Multi-Processor System-on-Chip and Hardware Accelerator// (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 8, No. 9, 2017. pp. 59-66.
8. R. Arroyo, J. J. Yebes, L. M. Bergasa, I. G. Daza, and J. Almazan, "Expert video-surveillance system for real-time detection of suspicious behaviors in shopping malls", Expert systems with Applications, Vol. 42, pp 7991-8005, 2015.
9. R. Shimonski, "Digital reconnaissance and surveillance", chapter 1 in cyber reconnaissance, surveillance and defense, 2014.
10. L. Deligiannidis, and H. R. Arabnia, "Security surveillance applications utilizing parallel video-processing techniques in the spatial domain", chapter 8 in Emerging Trends in Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition, 2015.
11. K. Rasool Reddy, K. Hari Priya, N. Neelima. "Object Detection and Tracking -- A Survey", International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2015.
12. V.N. Vapnik, "The Nature of Statistical Learning Theory", Springer, 2000.
13. A.Ben-Hur, D. Horn, H.T Siegelmann, V. Vapnik, "A support vector clustering method", 15th International Conference on , pp.724-727, 2000.

References

1. M. Bramberger, R. P. Pflugfelder, A. Maier, B. Rinner, B. Strobl, and H. Schwabach. A smart camera for traffic surveillance. In Proceedings of the First Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pages 153–164, 2003.
2. W. Wolf, B. Ozer, and T. Lv. Smart cameras as embedded systems. IEEE Computer, 35(9):48–53, September 2002.
3. Fahmi SH.S., Krylov YU.E., Hasan YA.A.A., Kostikova E.V. Kodek dlya peredachi morskikh syuzhetov v usloviyah ogranichenij kanala [Codec for transmitting sea stories under channel restrictions] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 164-171.
4. Fahmi SH.S., Bobrovskij A.I., Sokolov YU.M. Sintez ustrojstv piramidal'no-rekursivnogo kodirovaniya izobrazhenij na signal'nyh processorah [Synthesis of pyramid-recursive image encoding devices on signal processors]// Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 1. S. 78-89.
5. Fahmi Sh. S., Kostikova E. V., Shatalova N. V. Transport video systems on a crystal: Methods and technologies of design [On-Chip Transport Video Systems: Design Methods and Technologies]: Monograph.- St. Petersburg: Publishing and printing Association VUZ, 2020. p. 346.
6. Fahmi Sh. S., Shatalova N. V., Visloguzov V. V. Kostikova E. V. Multiprocessor transport video surveillance system based on the technology "system on a crystal" [Multi-processor video transport surveillance system based on system-on-a-chip technology] // Marine intellectual technologies. 2020. No. 3-1 (49). p. 172-180.
7. Mossaad B., Sabeur El k., Mohamed A. An Automated Surveillance System based on Multi-Processor System-on-Chip and Hardware Accelerator// (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 8, No. 9, 2017. pp. 59-66.
8. R. Arroyo, J. J. Yebes, L. M. Bergasa, I. G. Daza, and J. Almazan, "Expert video-surveillance system for real-time detection of suspicious behaviors in shopping malls", Expert systems with Applications, Vol. 42, pp 7991-8005, 2015.
9. R. Shimonski, "Digital reconnaissance and surveillance", chapter 1 in cyber reconnaissance, surveillance and defense, 2014.
10. L. Deligiannidis, and H. R. Arabnia, "Security surveillance applications utilizing parallel video-processing techniques in the spatial domain", chapter 8 in Emerging Trends in Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition, 2015.
11. K. Rasool Reddy, K. Hari Priya, N. Neelima. "Object Detection and Tracking -- A Survey", International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2015.
12. V.N. Vapnik, "The Nature of Statistical Learning Theory", Springer, 2000.
13. Ben-Hur, D. Horn, H.T Siegelmann, V. Vapnik, "A support vector clustering method", 15th International Conference on , pp.724-727, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shatillen@mail.ru

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Сергей Викторович Колесниченко, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д.5/7, e-mail: serjkor@yandex.ru

Shakeeb S. Fahmi, Associate Professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation.

Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Phd (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Elena V. Kostikova, Phd (Eng), Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Sergey V. Kolesnichenko, Associate Professor, Dr.Sci. (Eng), Head of the department of Mathematical Modeling and Applied Computer Science, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: serjkor@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 621.396.9

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.022>

Неиспользуемые потенциальные возможности в ГМССБ: цифровой избирательный вызов

В.В. Демидкин¹ e-mail: strophoida2@bk.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Цифровой избирательный вызов (ЦИВ) в Глобальной морской системе связи при бедствии и безопасности не позволяет передавать какой-либо текст, содержание которого отличается от разрешённых возможностей в семи форматах ЦИВ. Использование биграмм и триграмм для интерпретации произвольного текста и неиспользованные резервы в символах управления в форматах ЦИВ могут изменить эту ситуацию. Эта идея может быть распространена, по меньшей мере, на языки, в которых используется буквенный принцип записи текста. Идея остаётся в силе для языков с иероглифической формой записи, если существует ещё и альтернативная буквенная форма представления текста, подобная Путунгуа в китайском языке. Использование преимуществ ЦИВ в возможности определения ошибки в каждом принятом символе, двойная передача символов (в DX и RX позициях) даёт возможность изменения принципов приёма информации по безопасности мореплавания. Более того, НАВ-ТЕКС и ИБН УБПЧ можно объединить в одну общую систему передачи информации по безопасности мореплавания. Существует возможность исправления ошибок при принятии символов в расширенном цифровом избирательном вызове, используя перестановку символов при многоканальной трансляции информации по безопасности мореплавания. Как результат, будет отсутствовать необходимость учёта 4% норматива ошибок на объём принятого текста, поскольку ошибки в принятом тексте отсутствуют. Предложены способы организации произвольных сообщений и сообщений по безопасности мореплавания на английском и русском языках со сжатием информации при помощи расширенного цифрового избирательного вызова.

Ключевые слова: Расширенный цифровой избирательный вызов, прием информации по безопасности мореплавания, НАВИП, произвольные сообщения через цифровой избирательный вызов.

Unused resources in global maritime distress safety system: digital selective call

Vladimir V. Demidkin¹ e-mail: strophoida2@bk.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. Digital Selective Call (DSC) in Global Maritime Distress Safety System does not allow to broadcast any information that differs from allowed abilities in seven DSC formats. Using bigrams and trigram for interpretation of custom text and unused reserve of control characters in DSC formats would change this situation. This idea can be extended at least to the languages with a letter form of writing text. It is in valid for languages with hiero-glyphic notation, if alternative letter additional form exists, like Putonghua in Chinese language. Using DSC advantages in possibility error detecting in every received symbols, two times transmission of symbols (in DX and RX positions) and error-check characters in DX and RX positions give the opportunity to change principles of Maritime Safety Information (MSI) to be received on board the vessels. Moreover, NAVTEX and MSI NBDP systems can be combined in one common system. There is a possibility to correct errors in received symbols in Advanced Digital Selective Call using permutation of characters in multi-channel MSI broadcasting. As result, there is no need to use four percent reference error rate at received MSI text volume, because broadcasted information has not errors. Ways to organize self-compressing custom messages and Maritime Safety Information messages in English and Russian by Advanced Digital Selective Call has been offered.

Key words: Advanced Digital Selective Call, Maritime Safety Information reception, any messages via Digital Selective Call

Глобальная морская система связи при бедствии и обеспечения безопасности (ГМССБ) существует с 1 февраля 1999 года. По принципам её реализации для конкретных служб и сервисов можно заметить потенциально незадействованные ресурсы. Например, рассмотрим этот вопрос для цифрового избирательного вызова (ЦИВ).

Основой в реализации ЦИВ служат рекомендации Международного союза электросвязи (ITU – International Telecommunication Union), переиздаваемые по мере накопления нового опыта. Эволюция развития ЦИВ закрепляется (во многом) очередными версиями рекомендации ITU-RM.493 [1]. По своей сути, передача информации посредством ЦИВ сводится к использованию одного из 7 типов форматов, в которых оговаривается назначение каждой позиции значащего символа в конкретном выбранном оператором формате посредством встроенных программ (естественно для последующей правильной интерпретации принятого

сообщения). То есть передача неформатного текста, например, в виде произвольной текстовой информации по безопасности мореплавания не предусматривается.

Множество значащих символов в ЦИВ по факту, состоящее из 128 элементов ([1] TABLE A1-1 Ten-bit error-detecting code), разделено на два подмножества – подмножество непосредственно содержащих оперативную информацию от 00 до 99 и управляющие символы от 100 до 127. Интерпретация указаний от управляющих символов зависит от места их расположения в формате ЦИВ, да и используются далеко не все управляющие символы из этого подмножества. Это даёт возможность создавать форматы ЦИВ для формирования передачи произвольного текста или текста по передаче информации по безопасности мореплавания (MSI – Maritime safety information). В действующей версии рекомендации ITU-RM.821-1 [2] предполагалось использование расширений формата ЦИВ,

подавляющее большинство которых не используются из-за стремительного ввода аналогичных возможностей посредством АИС. Тем не менее, вряд ли стоит считать оптимальным решение трансляции названия судна с использованием множества из 41 элемента (от 00 по 41 из [2] Table 2 Symbols used to denote alphanumeric charters). В качестве указателя формата для передачи произвольных сообщений выберем символ (103). Теперь воспользуемся фактом существования устойчивых сочетаний биграмм и триграмм

(например) в английском и русском языках. Такой ЦИВ в дальнейшем будем называть расширенным цифровым избирательным вызовом (РЦИВ). В таблицах 1 и 2 показана предлагаемая интерпретация символов РЦИВ с использованием биграмм и триграмм для английского и русского языков с возможностью их одновременного использования для передачи общего файла произвольного смыслового текста. Отличия от оригинальной информации в [3] отмечено жирным шрифтом.

Таблица 1

Интерпретация в РЦИВ символов с использованием английского языка [3]

Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа
(00)	0	(31)	U	(62)	SE	(93)	UR
(01)	1	(32)	V	(63)	ET	(94)	ME
(02)	2	(33)	W	(64)	AL	(95)	WH
(03)	3	(34)	X	(65)	RI	(96)	TIO
(04)	4	(35)	Y	(66)	NG	(97)	THE
(05)	5	(36)	Z	(67)	SA	(98)	AND
(06)	6	(37)	TH	(68)	HI	(99)	THA
(07)	7	(38)	HE	(69)	LE	(100)	ENT
(08)	8	(39)	AN	(70)	SO	(101)	ION
(09)	9	(40)	IN	(71)	AS	(102)	HAVE
(10)	00	(41)	ER	(72)	NO	(103)	FOR
(11)	A	(42)	RE	(73)	NE	(104)	NDE
(12)	B	(43)	ES	(74)	EC	(105)	HAS
(13)	C	(44)	ON	(75)	IO	(106)	NCE
(14)	D	(45)	EA	(76)	RT	(107)	EDT
(15)	E	(46)	TI	(77)	CO	(108)	TIS
(16)	F	(47)	AT	(78)	BE	(109)	OFT
(17)	G	(48)	ST	(79)	DI	(110)	STH
(18)	H	(49)	EN	(80)	LI	(111)	MEN
(19)	I	(50)	ND	(81)	RA	(112)	ING
(20)	J	(51)	OR	(82)	MA	(113)	:
(21)	K	(52)	TO	(83)	TA	(114)	-
(22)	L	(53)	NT	(84)	CE	(115)	@
(23)	M	(54)	ED	(85)	IC	(116)	#
(24)	N	(55)	IS	(86)	LL	(118)	-
(25)	O	(56)	AR	(87)	NA	(119)	/
(26)	P	(57)	OU	(88)	RO	(120)	Пробел

(27)	Q	(58)	TE	(89)	OT	(121)	'
(28)	R	(59)	OF	(90)	TT	(123)	,
(29)	S	(60)	IT	(91)	VE	(124)	.
(30)	T	(61)	HA	(92)	NS	(126)	Команда перехода с английского языка на русский и обратно

Таблица 2

Интерпретация в РЦИВ символов с использованием русского языка [3]

Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа	Интерпретация семи информационных бит символа в десятичной системе счисления	Смысловое значение передаваемого символа
(00)	А	(31)	ОВ	(62)	ТА	(93)	ИЗ
(01)	Б	(32)	СТ	(63)	НЕ	(94)	МИ
(02)	В	(33)	НО	(64)	ЕТ	(95)	ЧЕ
(03)	Г	(34)	КО	(65)	ЛЕ	(96)	ДО
(04)	Д	(35)	ЕН	(66)	ОГ	(97)	ИВ
(05)	Е	(36)	ВО	(67)	ИН	(98)	ИЕ
(06)	Ж	(37)	НИ	(68)	ВЕ	(99)	ИЛ
(07)	З	(38)	РО	(69)	АС	(100)	МЕ
(08)	И	(39)	ТО	(70)	ТЕ	(101)	ТЬ
(09)	Й	(40)	РА	(71)	ЛО	(102)	МО
(10)	К	(41)	НА	(72)	ОН	(103)	ЛЬ
(11)	Л	(42)	ОС	(73)	ДЕ	(104)	АК
(12)	М	(43)	ГО	(74)	ОЙ	(105)	ИК
(13)	Н	(44)	ОД	(75)	ИС	(106)	ИМ
(14)	О	(45)	ПО	(76)	ИТ	(107)	СТО
(15)	П	(46)	АН	(77)	ОБ	(108)	ЕНО
(16)	Р	(47)	ОР	(78)	ТИ	(109)	НОВ
(17)	С	(48)	ОЛ	(79)	АЛ	(110)	ТОВ
(18)	Т	(49)	ПР	(80)	ЕД	(111)	ОВО
(19)	У	(50)	СК	(81)	АТ	(112)	ОВА
(20)	Ф	(51)	ЕР	(82)	СО	(113)	:
(21)	Х	(52)	ОТ	(83)	ТВ	(114)	Новая строка
(22)	Ц	(53)	ОМ	(84)	КИ	(115)	(
(23)	Ч	(54)	ЕС	(85)	АР	(116))
(24)	Ш	(55)	РЕ	(86)	ТР	(118)	-
(25)	Щ	(56)	ЛИ	(87)	ДА	(119)	/

(26)	Ь	(57)	НЫ	(88)	СЕ	(120)	Пробел
(27)	Ы	(58)	АВ	(89)	ЕМ	(121)	"
(28)	Э	(59)	ЕЛ	(90)	КА	(123)	,
(29)	Ю	(60)	ЗА	(91)	НН	(124)	.
(30)	Я	(61)	ВА	(92)	РИ	(126)	<i>Команда перехода с английского языка на русский и обратно</i>

Для большего сжатия текста на русском языке при передаче цифр предлагается использовать символы из табл. 1.

Если рассматривать, скажем, китайский текст, передаваемый при помощи РЦИВ, то следует учесть биграмы и триграммы звукобуквенного китайского алфавита. Так согласно [4] "в 1958 году в КНР был законодательно утвержден звукобуквенный алфавит. С тех пор слова китайского языка путунхуа обрели звукобуквенный стандарт, существующий параллельно с иероглифическим. В Нормативном словаре современного китайского языка (Пекин, 2005г.) содержится 68 тысяч слов и выражений, для записи которых используются 13 тысяч иероглифов. Это же количество слов и выражения в словаре параллельно записаны 25 буквами и пятью надстрочными диакритиками".

Использование разделения в ЦИВ на основную и резервную позицию передачи, использование контрольной суммы для обеих позиций [1] создают

ресурс для объединения двух служб ГМССБ - NAVTEX и MSI NBDP по передачи MSI информацию в единую службу посредством РЦИВ. Так в [5] описан способ корректировки ошибок при приёме MSI (по меньшей мере) с использованием в РЦИВ трёхканального способа. То есть, выбирается из множества каналов одновременной передачи по числу ошибок лучшие три канала. По взаимной перестановке вместо искажённых правильных символов осуществляется возможность правильного приёма всего текста сообщения. Это позволит оказаться от критерия оценки факта успешного или неуспешного приёма сообщения по 4 процентному сценарию, упомянутому в [6, 7].

Можно использовать РЦИВ также для национальной системы НАВИП для передачи MSI. Способ интерпретации символов РЦИВ (вызываемых, к примеру, незадействованным ранее указателем формата 119 в [1]) показан в таблице 3.

Таблица 3

Предлагаемая смысловая интерпретация символов РЦИВ для НАВИП [8]

Первые семь информационных бит символа в десятичной форме представления	Смысловая интерпретация передаваемого символа	Первые семь информационных бит символа в десятичной форме представления	Смысловая интерпретация передаваемого символа	Первые семь информационных бит символа в десятичной форме представления	Смысловая интерпретация передаваемого символа
(00)	0, 00	(42)	Ан, ан, 42	(84)	Ол, ол, 84
(01)	1, 01	(43)	Ас, ас, 43	(85)	Ом, ом, 85
(02)	2, 02	(44)	Ат, ат, 44	(86)	Он, он, 86
(03)	3, 03	(45)	Бо, бо, 45	(87)	Ор, ор, 87
(04)	4, 04	(46)	Ве, ве, 46	(88)	От, от, 88
(05)	5, 05	(47)	Го, го, 47	(89)	По, по, 89
(06)	6, 06	(48)	Да, да, 48	(90)	Пр, пр, 90
(07)	7, 07	(49)	Де, де, 49	(91)	Ра, ра, 91
(08)	8, 08	(50)	До, до, 50	(92)	Ро, ро, 92
(09)	9, 09	(51)	Ед, ед, 51	(93)	Ск, ск, 93
(10)	А, а, А, а, 10	(52)	Ел, ел, 52	(94)	Со, со, 94
(11)	Б, б, В, в, 11	(53)	Ем, ем, 53	(95)	Та, та, 95
(12)	В, в, W, w, 12	(54)	Ен, ен, 54	(96)	Тв, тв, 96
(13)	Г, г, G, g, 13	(55)	Ер, ер, 55	(97)	Те, те, 97
(14)	Д, д, D, d, 14	(56)	Ес, ес, 56	(98)	Ти, ти, 98
(15)	Е, е, E, e, 15	(57)	Ет, ет, 57	(99)	То, то, 99
(16)	Ж, ж, V, v, 16	(58)	Ив, ив, 58	(100)	Тр, тр

(17)	З, з, Z, z, 17	(59)	Ие, ие, 59	(101)	Че, че
(18)	И, и, I, i, 18	(60)	Из, из, 60	(102)	МСК, УТС
(19)	Й, J, j, 19	(61)	Ил, ил, 61	(103)	СЕВ
(20)	К, к, K, k, 20	(62)	Ин, ин, 62	(104)	ЮЖН
(21)	Л, л, L, l, 21	(63)	Ис, ис, 63	(105)	ВОСТ
(22)	М, м, M, m, 22	(64)	Ит, ит, 64	(106)	ЗАП
(23)	Н, н, N, n, 23	(65)	Ка, ка, 65	(107)	НАВИП
(24)	О, о, O, o, 24	(66)	Ки, ки, 66	(108)	НАВАРЕА
(25)	П, п, P, p, 25	(67)	Ко, ко, 67	(109)	@(пары из цифр)
(26)	Р, р, R, r, 26	(68)	Ла, ла, 68	(110)	№ (номер)
(27)	С, с, S, s, 27	(69)	Ле, ле, 69	(111)	Δ (пробел)
(28)	Т, т, T, t, 28	(70)	Ли, ли, 70	(112)	,(запятая)
(29)	У, у, U, u, 29	(71)	Ло, ло, 71	(113)	. (точка)
(30)	Ф, ф, F, f, 30	(72)	Ме, ме, 72	(114)	–(тире)
(31)	Х, х, H, h, 31	(73)	Ми, ми, 73	(115)	/ (дробь)
(32)	Ц, ц, C, c, 32	(74)	Не, не, 74	(116)	((левая скобка)
(33)	Ч, ч, 33	(75)	Ни, ни, 75	(118))(правая скобка)
(34)	Ш, ш, 34	(76)	нн, 76	(119)	« (левая кавычка)
(35)	Щ, щ, Q, q, 35	(77)	Но, но, 77	(120)	» (правая кавычка)
(36)	Ъ, X, x, 36	(78)	Ны, ны, 78	(121)	: (двоеточие)
(37)	Ы, Y, y, 37	(79)	Об, об, 79	(123)	; (точка с запятой)
(38)	Э, э, 38	(80)	Ов, ов, 80	(124)	¶ (новая строка)
(39)	Ю, ю, 39	(81)	Ог, ог, 81	(125)	Выбор между прописной и строчной буквами
(40)	Я, я, 40	(82)	Од, од, 82	(126)	Команда перехода с английского языка на русский и обратно
(41)	Ал, ал, 41	(83)	Ой, ой, 83	(117), (122), (127)	Не использовать

Английские буквы использованы в таблице 3 для передачи слов, где это необходимо для интерпретации названий в текстах НАВИП. Отличия от оригинальной информации в [8] отмечено жирным шрифтом.

Предложенный способ передачи сообщений посредством ЦИВ может также стать полезным дополнением в использовании радиоканалов для технологий австрийской компании *Frequentis* (в частности для *Frequentis Global Maritime Distress and Safety System*) [9]. Данная компания является международным производителем систем связи и информации для центров управления в разных

странах, связанными с критичными для безопасности задачами в авиации и для флота. Например, в Гренландии из пункта *Aasiaat* из семи рабочих мест посредством *IP*-интерфейсов возможно коммутировать до 248 радиостанций, работающих в УКВ и КВ диапазонах, для голосовой передачи сообщений прогнозов погоды и навигационных предупреждений [10]. Использование в радиоканалах РЦИВ с канальной корректировкой ошибок позволило бы расширить возможности технологий компании *Frequentis* в области оперативности, документальности и надёжности приёма информации.

Литература

1. Recommendation ITU-R M.493-15. Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service. International Telecommunication Union. 2019, pp. 1 – 62.
2. Recommendation ITU-R M.821-1. Optional expansion of the digital selective-calling system for use in the maritime mobile service. 1997, pp.1 – 7.
3. Демидкин В.В. Оценка возможностей передачи двуязычных сообщений с использованием расширенного цифрового избирательного вызова. Материалы восьмой регион. научно-технической конференции:

- «Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России». Часть 2. Новороссийск: РИО МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010. С. 27–30.
4. Алексахин А.Н. Алфавит китайского языка путунхуа. Буква. Фонема. Звук. Слог: для начинающих и продолжающих изучать китайский язык. М.: АСТ: Восток – Запад; Владимир: ВКТ, 2008. 96 с.
 5. Демидкин В.В. Способ многоканального приёма и передачи информации по безопасности мореплавания. Патент РФ на изобретение № 2527189. Бюллетень № 24 от 27.08.2014.
 6. Revised NAVTEX Manual. MSC.1/Circ. 1403. International Maritime Organization. 23 November 2016. pp. 1 – 46.
 7. International Maritime Organization Resolution A.700 (17) (Adopted 6 November 1991). Performance standards for narrow-band direct printing telegraph equipment for the reception of navigational and meteorological warnings and urgent information to ships (MSI) by HF. pp. 1 – 2.
 8. Демидкин В.В. Формат сообщения для передачи навигационных предупреждений в национальной системе коротковолнового диапазона посредством расширенного цифрового избирательного вызова. Эксплуатация морского транспорта №1 (74). Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2015. С. 52–56.
 9. Greenland enhances safety at sea with Frequentis GMDSS. October/November 2019. p.18. <http://www.thegigitalship.com>. (дата обращения: 19.02.2021)
 10. Greenland enhances safety at sea with FREQUENTIS technology. Press Release. Vienna / AUSTRIA, 9 September 2019 .<http://www.frequentis.com> (дата обращения: 21.02.2021).

References

1. Recommendation ITU-R M.493-15. Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service. International Telecommunication Union. 2019, pp. 1 – 62.
2. Recommendation ITU-R M.821-1. Optional expansion of the digital selective-calling system for use in the maritime mobile service. 1997, pp. 1 – 7.
3. Demidkin V.V. Otsenka vozmozhnostey peredachi dvuyazychnykh soobshcheniy s ispol'zovaniyem rasshirennogo tsifrovogo izbiratel'nogo vyzova [Evaluation of bilingual messaging capabilities using enhanced digital selective calling]. Materialy vos'moy region. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Problemy ekspluatatsii vodnogo transporta i podgotovki kadrov na yuge Rossii». Chast' 2. Novorossiysk: RIO MGA im. adm. F.F. Ushakova, 2010. S. 27–30.
4. Aleksakhin A.N. Alfavit kitayskogo yazyka Putunkhua. Bukva. Fonema. Zvuk. Slog: dlya nachinayushchikh i prodolzhayushchikh izuchat' kitayskiy yazyk [The alphabet of the Chinese language putonghua. Letter. Phoneme. Sound. Syllable: for beginners and those who continue to learn Chinese]. M.: AST: Vostok – Zapad; Vladimir: VKT, 2008. 96 s.
5. Demidkin V.V. Sposob mnogokanal'nogo priyoma i peredachi informatsii po bezopasnosti moreplavaniya [Method of multi-channel reception and transmission of information on the safety of navigation]. Patent RF na izobreteniyе № 2527189. Byulleten' № 24 ot 27.08.2014.
6. Revised NAVTEX Manual. MSC.1/Circ. 1403. International Maritime Organization. 23 November 2016. pp. 1 – 46.
7. International Maritime Organization Resolution A.700 (17) (Adopted 6 November 1991). Performance standards for narrow-band direct printing telegraph equipment for the reception of navigational and meteorological warnings and urgent information to ships (MSI) by HF. pp. 1 – 2.
8. Demidkin V.V. Format soobshcheniya dlya peredachi navigatsionnykh preduprezhdeniy v natsional'noy sisteme korotkovolnovogo diapazona posredstvom rasshirennogo tsifrovogo izbiratel'nogo vyzova [Message format for transmitting navigation warnings in the national shortwave system by means of an extended digital selective call]. Eksploatatsiya morskogo transporta №1 (74). Novorossiysk: RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. 2015. S. 52–56.
9. Greenland enhances safety at sea with Frequentis GMDSS. October/November 2019. p.18. <http://www.thegigitalship.com>. (data obrashcheniya: 19.02.2021)
10. Greenland enhances safety at sea with FREQUENTIS technology. Press Release. Vienna / AUSTRIA, 9 September 2019 .<http://www.frequentis.com> (data obrashcheniya: 21.02.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Владимирович Демидкин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовождения, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: strophoida2@bk.ru

Vladimir V. Demidkin, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the navigation department, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenina Avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: strophoida2@bk.ru

Поступила в редакцию: 12.07.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 656.62: 504.4.054

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.036>

Оценка возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов

Е.А. Батанина¹ e-mail: ea-batanina@yandex.ru, О.Л. Домнина¹ e-mail: o-domnina@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. При прогнозировании последствий аварий с участием транспортных судов существует необходимость в получении оперативных оценок размера вреда и длительности воздействия загрязняющих веществ в водных объектах для определения уровня реагирования и разработки защитных мероприятий. Наибольшую экологическую опасность представляют сбросы следующих грузов: удобрений, нефтепродуктов, соли, соды, серы, угля. В статье решается задача по определению возможного размера вреда при аварийных сбросах не нефтеналивных грузов с судов в Волжском бассейне внутренних водных путей. Для этого создана база данных по транспортным происшествиям с участием сухогрузных судов за период наблюдения с 2007 по 2018 гг., выполнено определение гидрологических условий распространения загрязняющих веществ и оценка их концентраций в воде для расчета длительности воздействия. Методика оценки возможного размера вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов при транспортных происшествиях основывается на учете агрессивности ингредиентов различных видов грузов и условных вероятностей их сброса, времени и места сброса, длительности воздействия. В результате выполненных исследований разработано математическое описание для оценки возможного размера вреда водным объектам от сбросов сыпучих грузов при транспортных происшествиях; создана классификация участков концентрации транспортных происшествий по уровню возможного размера вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов; получено уравнение связи размеров вреда при сбросе сыпучих грузов и грузоподъемности судна (массы сброса).

Ключевые слова: транспортные происшествия, судно, возможный размер вреда, аварийный сброс, сыпучий груз, водный транспорт, безопасность, охрана окружающей среды.

Assessment of the possible amount of harm in case of emergency discharges of bulk cargo from ships

Ekaterina A. Batanina¹ e-mail: ea-batanina@yandex.ru, Olga L. Domnina¹ e-mail: o-domnina@yandex.ru

¹Volga State University of Water Transport, N. Novgorod, Russian Federation

Abstract. When predicting the consequences of accidents involving transport vessels, there is a need to obtain operational estimates of the amount of harm and the duration of exposure to pollutants in water bodies to determine the level of response and develop protective measures. The greatest environmental hazard is posed by the discharges of the following cargoes: fertilizers, oil products, salt, soda, sulfur, coal. The article solves the problem of determining the possible amount of harm in case of emergency discharges of non-oil cargo from ships in the Volga basin of inland waterways. For this, a database on transport accidents involving dry cargo vessels was created for the observation period from 2007 to 2018, the hydrological conditions of the spread of pollutants were determined and their concentrations in water were estimated to calculate the duration of exposure. The methodology for assessing the possible amount of harm to water bodies during the discharge of bulk cargo in transport accidents is based on taking into account the aggressiveness of the ingredients of various types of cargo and the conditional probabilities of their discharge, the time and place of discharge, and the duration of exposure. As a result of the research carried out, a mathematical description was developed to assess the possible extent of damage to water bodies from discharges of bulk cargo during transport accidents; a classification of areas of concentration of traffic accidents was created according to the level of possible damage to water bodies during the discharge of bulk cargo; an equation was obtained for the relationship between the size of damage during the discharge of bulk cargo and the carrying capacity of the vessel (discharge mass).

Keywords: transport accidents, vessel, possible size of damage, emergency discharge, bulk cargo, water transport, safety, environmental protection.

Введение

Аварийные ситуации на водном транспорте достаточно часто сопровождаются интенсивным загрязнением окружающей среды, связанным в первую очередь со сбросом груза в водный объект [1 – 3]. В зависимости от вида груза, характеристик водного объекта и условий сброса длительность воздействия и площадь загрязнения могут быть очень значительными, что обуславливает необходимость прогнозирования и разработки защитных мероприятий [4 – 6]. Одним из основных этапов разработки защитных мероприятий является исчисление размеров вреда, необходимая как для обоснования уровня реагирования, так и для оценки эффективности природоохранной деятельности [7 – 9].

Созданию методологии оценки экологических последствий сбросов опасных грузов при эксплуатации судов посвящены работы [10 – 12].

Особый интерес представляет исследование [13], в котором отмечается, что ежегодный объем перевозок по Мировому океану превышает 9 миллиардов тонн грузов, причем насыпные грузы составляют самую большую группу грузов. В этой работе выполнен анализ риска для морской среды транспортировки и связанной с ней сбросом сухих грузов в море. Авторами [13] установлено, что более 2,15 миллиона тонн навалочных грузов ежегодно могут попадать в океаны, из которых 100 000 тонн потенциально вредны для морской среды; сделан вывод о наличии затруднений научно-методического характера при проведении оценки угрозы морской среде из-за отсутствия доступной информации о

химическом составе, биодоступности и токсичности ингредиентов грузов.

Важными направлениями исследований в области оценки негативного воздействия сбросов опасных грузов в водные объекты являются: создание и применение программно-аппаратных комплексов для оценки воздействия [14 – 16], реконструкции аварий со сбросом опасных грузов [17 – 19], разработки методов мониторинга и обнаружения источников загрязнения [20 – 22], создания систем реагирования [23 – 25].

В тоже время большинство проанализированных работ посвящены разливам нефти и сбросам опасных грузов на морских акваториях, а вопросу прогнозирования и оценки экологических последствий сбросов сыпучих грузов как на море, так на внутренних водных путях уделено мало внимания.

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели оценки размеров возможного вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов при транспортных происшествиях с участием судов.

Для достижения поставленной цели мы сформулировали следующие задачи:

- собрать и обработать статистические данные по транспортным происшествиям с участием судов за репрезентативный период наблюдения, сопровождающихся сбросом сыпучих грузов;
- создать базы данных по факторам, влияющим на длительность воздействия и размер вреда;
- разработать математическое описание и методику его применения для оценки размеров возможного экологического вреда водным объектам от сброса сыпучих грузов в результате транспортных происшествий;
- создать классификацию участков концентрации транспортных происшествий по уровню размеров возможного экологического вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов;
- получить уравнение связи размеров экологического вреда при сбросе сыпучих грузов и грузоподъемности судна (массы сброса).

Материалы и методы

Для оценки возможного размера экологического вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов (загрязняющих веществ) в результате транспортных происшествий (ТП) с участием сухогрузных судов на внутреннем водном транспорте (ВВТ) разработана база данных (БД), аккумулирующая информацию по ТП Волжского бассейна (далее БДТП) [26]. Формирование БДТП осуществлялось на основании статистической информации по ТП за период с 2007 по 2018 гг., представленной Федеральной службой по надзору в сфере транспорта (о месте и дате ТП, причине его возникновения, судах с указанием их основных характеристик, наименовании перевозимых грузов, сведениях о потере груза). В БДТП представлены границы участков концентрации транспортных происшествий (далее УКТП), определенные при уровне значимости 0,05.

В табл. 1 представлен фрагмент БДТП.

Таблица 1

Фрагмент БДТП для Волжского бассейна

Границы участка, км	Выборочная средняя координаты ТП, км	Количество ТП на участке	Количество ТП с сухогрузными судами
862-869	865,7	20	11
884-889	886,2	15	6
1303-1313	1309,1	17	14
2227-2232	2230,5	4	4
2726-2729	2727,7	3	3
2792-2798	2794,6	5	4

Путем анализа БДТП на УКТП выделены ТП, произошедшие с сухогрузными судами, которые сопровождаются потерей груза. В работе также учитывались статистические данные по сбросам сыпучих грузов за временной интервал с 1980 по 2006 годы для получения консервативных оценок уровня последствий.

Для определения длительности воздействия загрязняющих веществ применялись Рекомендации Росгидромета Р 52.24.627-2007.

При расчете концентрации загрязняющих веществ в воде использовалась формула уравнения дисперсии.

В табл. 2 представлен фрагмент созданной БД по факторам, влияющим на длительность воздействия и размер вреда, полученной в системе PISCES 2 [27].

Таблица 2

Фрагмент БД по факторам, влияющим на длительность воздействия и размер вреда

Выборочная средняя координаты ТП, км	Глубина, м	Ширина, м	Скорость течения, м/с
526	5,8	600	0,895
875,8	4,5	800	1,145
1069,3	10,4	1900	0,9393
1190	5,5	1500	0,3425
1282	12,8	5300	0,751
1309,1	15,7	6600	0,395

Ранжирование УКТП по возможному размеру вреда от сброса сыпучих грузов в водный объект проведено с помощью формулы Стерджесса и рекомендаций Йетса [6].

Результаты и обсуждение

Возможный размер вреда от потери груза (определенный при условии реализации события «транспортное происшествие, сопровождающееся потерей груза, случилось») зависит от вида груза и массы сброса загрязняющих веществ (ингредиентов):

$$R_{ВВПГСУХj}^{УК} = \sum_{k=1}^g \sum_{q=1}^z P_{ПГjk}^{УК} \cdot Y_{jkq}, \quad (1)$$

где $P_{ПГjk}^{УК}$ – оценка вероятности появления сброса k-ого вида груза на j-ом УКТП с сухогрузных судов;

Y_{jkq} – размер экологического вреда водному объекту при потере k-того вида груза, состоящего из

q- вредных (загрязняющих) веществ) на j-ом УКТП с сухогрузных судов, млн. руб.;

k- вид груза, в данной работе рассматривались соль, минеральные удобрения и взвешенные вещества;

q – компоненты (ингредиенты) груза, из которых состоит k-ый вид груза, т.

Оценку вероятности $P_{ПГjk}^{УК}$ определяется по формуле:

$$P_{ПГjk}^{УК} = \frac{n_{ПГjk}}{N_{ПГi}} \quad (2)$$

где $n_{ПГjk}$ – количество ТП с потерей k-ого вида груза на j-ом УКТП;

$N_{ПГi}$ – количество ТП с потерей груза в границах i-й администрации бассейна (АБ) с участием сухогрузных судов за репрезентативный период наблюдения.

Размер экологического вреда водному объекту при потере груза предлагается рассчитывать в соответствии с действующей методикой исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства [10].

$$У_{jkq} = K_{ПКj} \cdot K_B \cdot K_{ИН} \cdot K_{ДЛjq} \cdot \sum_{n=1}^n H_{jkq} \quad (3)$$

где $K_{ПКj}$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия на j-ом УКТП;

K_B – коэффициент, учитывающий экологическое состояние водных объектов;

$K_{ИН}$ – коэффициент, учитывающий инфляционную индексацию;

$K_{ДЛjq}$ – коэффициент, учитывающий продолжительность воздействия каждого q-го загрязняющего вещества на водный объект при непринятии мер по его ликвидации на j-ом УКТП для;

H_{jkq} – такса для расчета размера экологического вреда при загрязнении водного объекта на j-ом УКТП q-м загрязняющим веществом в составе k-вида груза, млн. руб.

Для расчета концентрации загрязняющих веществ в воде и определения длительности их воздействия применялось решение одномерного уравнения дисперсии для точечного сброса загрязняющего вещества в водный объект:

Для расчета концентрации загрязняющих веществ в воде и определения длительности их воздействия применялось решение одномерного уравнения дисперсии для точечного сброса загрязняющего вещества в водный объект:

$$C_{Lx,\tau} = \frac{m_B}{F(4 \cdot \pi \cdot D_X \cdot \tau)^{0.5}} \cdot \exp \left[-\frac{(L_X - v \cdot \tau)^2}{4 \cdot D_X \cdot \tau} - K \cdot \tau \right], \quad (4)$$

где $C_{Lx,\tau}$ – средняя концентрация вещества в водном потоке на расстоянии L_X через время τ , г/м³;

m_B – начальная масса сброшенного в водоток вещества по каждому компоненту груза, г;

F – площадь поперечного сечения водного потока, м²;

Для каждого УКТП площадь поперечного сечения водного потока рассчитывалась исходя из средней ширины и глубины водного потока с использованием электронной картографической системы PISCES 2.

D_X – коэффициент продольной дисперсии, м²/с;

τ – время, прошедшее от начала сброса вещества в водоток, с;

K – коэффициент скорости самоочищения воды от сброшенного вещества, 1/с.

Время перемещения центра зоны высокозагрязненных вод между исходным и заданным контрольным створами определялось по формуле:

$$\tau = \frac{L_X}{v}, \quad (5)$$

где L_X – общая протяженность участка реки по фарватеру от места аварийного сброса загрязняющих веществ до заданного x-го створа, м;

v – средняя скорость течения воды на речном участке длиной L_X , м/с.

Коэффициент продольной дисперсии D_X определялся по формуле:

$$D_X = 43000 H v C^{-2.63}, \quad (6)$$

где v – средняя по сечению речного потока скорость течения воды на рассматриваемом участке реки, м/с;

H – средняя глубина речного потока в рассматриваемом створе, м;

C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с.

Коэффициент Шези C рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{H^{2.5} \cdot \sqrt{n_w} - 0.13 - 0.75 \cdot \sqrt{H} \cdot (\sqrt{n_w} - 0.1)}{n_w}, \quad (7)$$

где n_w – коэффициент шероховатости русла, рассчитываемый по формуле:

$$n_w = 0.03 \cdot d_s^{1/6}. \quad (8)$$

Здесь d_s – эффективный диаметр донных отложений, мм (принят равным 0,033).

Для определения пространственно-временных границ негативного воздействия сброса сыпучего груза применяется условие:

$$C_{Lx,\tau} \leq \text{ПДК} \quad (\text{ПДК}_{в.х.} \text{ или } \text{ПДК}_{р.х.}) \quad (9)$$

где ПДК – предельно-допустимая концентрация;

ПДК в.х. – ПДК загрязняющего вещества для водохозяйственных водоемов;

ПДК р.х. – ПДК загрязняющего вещества для рыбохозяйственных водоемов.

Совокупность выражений (1) – (9) представляют собой математическое описание для оценки возможного размера вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов при транспортных происшествиях с участием судов.

Для Волжского бассейна $K_{ПКj} = 1,1$ (определен по среднему выборочному значению месяца возникновения ТП 8,1875); $K_B = 1,41$ (река Волга);

$K_{ИН} (2020) = 2,78$.

$K_{ДЛ}$ в данной работе рассчитывался исходя из времени достижения концентрации в воде n-го загрязняющего вещества уровня ПДК р.х.

Расчет возможных концентраций загрязняющих веществ, попадающих в водный объект при сбросе груза, производился при следующих условиях и допущениях:

- полного перемешивания и растворения сухих веществ в водоеме;
- образования консервативных примесей;

- о равномерности распределения значений концентрации загрязняющего вещества в зоне высокого загрязнения по ширине реки;
- о близком к прямоугольнику очертанию поперечного сечения реки;
- практически мгновенном перемешивании вод по вертикали.

На основе полученных данных определен возможный размер экологического вреда водному объекту в результате сброса загрязняющих веществ с сухогрузных судов. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты оценки возможного размера вреда при сбросе загрязняющих веществ в границах УКТП 524-529 (526) км. Расчет выполнен для средней грузоподъемности судна 1903 т.

С помощью формулы Стерджесса и рекомендаций Йетса проведено ранжирование УКТП по возможному размеру вреда от сброса сыпучих грузов в водный объект с последующей классификацией по степени опасности (табл. 4).

На основе фактических данных по сбросам сыпучих грузов с судов в Волжском бассейне, содержащихся в БДТП, в математической системе STATISTICA 8.0 построено уравнение связи между размером вреда и грузоподъемностью судна (рис. 1).

Выполненные исследования определяют следующую методику (последовательность) оценки

возможного размера вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов при транспортных происшествиях:

- 1) Формирование БДТП для рассматриваемого бассейна внутренних водных путей.
- 2) Создание БД по факторам, влияющим на длительность воздействия и размер вреда.
- 3) Определение перечня и компонентного состава перевозимых сыпучих грузов.
- 4) Оценка границ УКТП.
- 5) Определение природно-климатических условий распространения загрязняющих веществ.
- 5) Расчет концентраций загрязняющих веществ в воде и определения длительности их воздействия.
- 6) Оценка размера экологического вреда, причиненного водному объекту на отдельных УКТП.
- 7) Оценка вероятности появления сброса груза на отдельных УКТП.
- 8) Расчет возможных размеров экологического вреда, причиненного водному объекту на отдельных УКТП.
- 9) Классифицирование УКТП.
- 10) Расчет возможных размеров экологического вреда, причиненного водным объектам в границах отдельной Администрации внутренних водных путей.

Таблица 3

Оценка возможного размера вреда при сбросе загрязняющих веществ

Вид груза	Компоненты груза	Масса компонента, т	$K_{дл}$	H_{jkq}	U_{jkq} , млн. руб.	$\sum U_{jkq}$, млн. руб.	$P_{ПГjk}^{УК}$	$R_{ВВПГСУХj}^{УК}$ млн. руб.
соль	хлорид	1027,6	1,1	265,9	1261,1525	2237,9173	0,12	1433,052982
	кальций	15,22	1,1	5,37	25,469684			
	натрий	685,1	1,1	181,7	861,79547			
	магний	15,22	1,1	5,37	25,469684			
	сульфат – ион	41,9	1,1	13,5	64,029933			
удобрения	калий	758,6	1,7	199,93	1465,4921	2882,4034	0,05	
	кальций	5,5	1,1	2,2	10,434508			
	магний	19,4	1,1	6,8	32,252114			
	натрий	134,95	1,1	39,8	188,76973			
	хлорид	961,6	1,1	249,94	1185,4549			
смеси	взвешенные вещества	1903	5	473,3	10203,827	10203,827	0,1	

Таблица 2

Классификация УКТП Волжского бассейна по уровню возможного размера вреда при сбросе сыпучих грузов при авариях судов

№ класса	Наименование	Участки-представители, км	Диапазон изменения возможного размера вреда, млн. руб.
1	Умеренно опасные	1353-1365; 1378-1382; 1388-1393; 1527-1528; 1922-1924; 2160-2168; 1277-1288; 1303-1313; 1314-1320; 1314-1320; 1322-1325; 2227-2232; 2516-2524; 1069-1070; 1069-1070; 1731-1743; 2941-2943	611,292-875,9684
2	Значительно опасные	2815-2817; 1675-1677; 2581-2584	876,9684-1272,982
3	Высоко опасные	2574-2580; 884-889; 903-906; 933;-936; 1190-1190; 2550-2552; 2745-2746; 2784-2786; 2792-2798; 908-920; 2643-2647; 2726-2729; 862-869; 857-858; 874-878; 524-529; 860-860; 894-899; 901-902	1272,982-1537,657

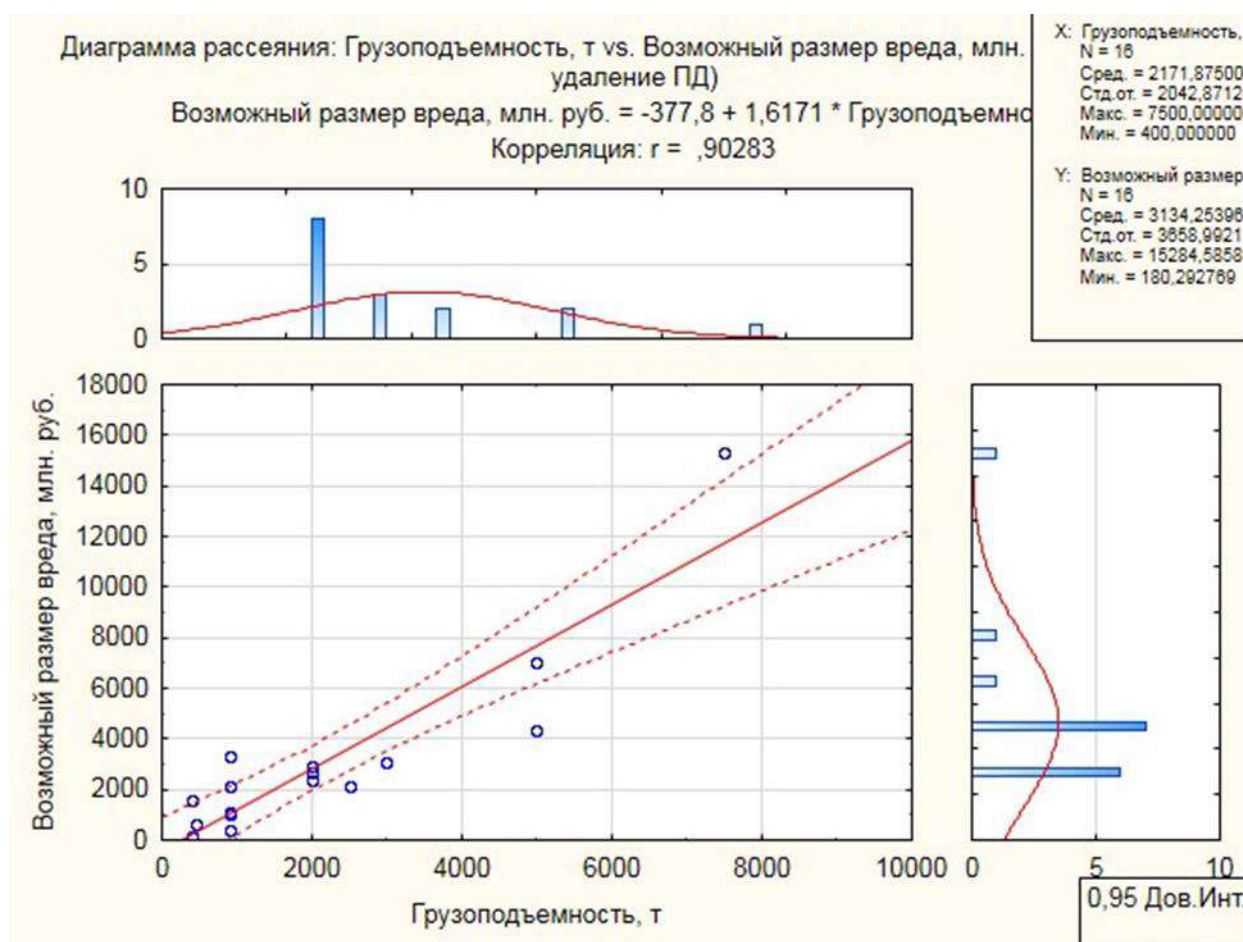


Рис. 1. Уравнение связи размеров вреда при сбросе сыпучих грузов и грузоподъемности судна (массы сброса)

Заключение

В результате проведенных авторами исследований были получены следующие новые результаты:

- разработана математическая модель оценки возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов, используя которую можно оперативно оценить риски последствий ТП, сопровождающихся потерей груза;

- создана классификация УКТП по уровню возможного размера экологического вреда при сбросе сыпучих грузов при авариях судов;

- получено уравнение связи размеров экологического вреда при сбросе сыпучих грузов и грузоподъемности судна (массы сброса).

Практическая ценность работы состоит в разработке методики оценки возможного размера экологического вреда водным объектам при сбросе сыпучих грузов при транспортных происшествиях, основанной на учете агрессивности ингредиентов

различных видов грузов и условных вероятностей их сброса, времени и места сброса, длительности воздействия.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на совершенствование оценок воздействия сыпучих грузов путем учета следующих факторов:

- неполного и протяженного во времени перемешивания и растворения сухих веществ в водоеме,

- образования неконсервативных примесей и их взаимодействия с фоновыми загрязняющими веществами;

- неравномерности распределения концентрации загрязняющего вещества в зоне высокозагрязненных вод по ширине реки;

- создания трехмерных моделей водных объектов.

Литература

1. Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Батанина Е.А., Наумов В.С. Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан. Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4-2 (46). С. 79-84.
2. Пластинин А.Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 1 (20). С. 97-104.
3. Бородин А.Н. Совершенствование тренажерной подготовки по ликвидации разливов нефти при эксплуатации судов на внутренних водных путях. Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. 2009. № 9. С. 259-260.
4. Пластинин А.Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 2. С. 129-135.
5. Решняк В.И., Пластинин А.Е., Наумов В.С., Слюсарев А.С. Применение озона в процессах очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 168-173.
6. Пластинин А.Е. Оценка риска возникновения транспортных происшествий. Речной транспорт (XXI век). 2013. № 3 (62). С. 83-88.
7. Решняк В.И., Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Экологическое обеспечение водного туризма. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 154-160.
8. Пластинин А.Е. Оценка размера вреда, причиненного почве, при разливах нефти с судов. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 74-83.
9. Шматкова Е.Ю., Пластинин А.Е., Балденков А.П., Бородин А.Н. Оценка воздействия разливов нефти на экологически чувствительные районы в Печорском бассейне. В сборнике: Великие реки - 2020. Труды 22-го международного научно-промышленного форума. 2020. С. 18.
10. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 79-86.
11. Пластинин А.Е. Методология прогнозирования и ликвидации последствий загрязнения окружающей среды при разливах нефти. В сборнике: Великие реки'2014. Труды конгресса 16-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2014. С. 124-127.
12. Решняк В.И. Оценка уровня экологической опасности источников аварийных разливов нефти. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 72-76.
13. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Wahrendorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment?, Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.
14. Leiger, R., Aps, R., Fetissov, M., Herkül, K., Kopti, M., Kotta, J., Mander, Ü., Suursaar, Ü. (2009). Oil accident response simulation: Allocation of potential places of refuge. WIT Transactions on Ecology and the Environment 126: 247-258.
15. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков В.С., Отделкин Н.С. Моделирование всплытия нефти от подводных источников в ледовых условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-2 (42). С. 87-91.
16. Acir, O., Aps, R., Fetissov, M., Sert, M. (2011). Environmental impact assessment based on a potential oil spill scenario: Eastern Black Sea coastal zone, Turkey. WIT Transactions on Ecology and the Environment 149: 273-283.
17. Pocora, A., Purcarea, A.A., Nicolae, F., Cotorcea, A. (2018). Modelling and simulation of oil spills in coastal waters. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 172(1), 012012.
18. K Łazuga, L Gućma, M Perkovic. (2013). M/t "Baltic Carrier" accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 36(108) z. 1 pp. 110–115.
19. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydın Şihmantepe, Murat Selçuk Solmaz. (2020). A case study on oil pollution in Istanbul Strait: Revisiting 1994 Nassia tanker accident by utilising Potential Incident Simulation Control and Evaluation System (PISCES-II) simulation. What would be different in terms of response if Nassia accident happened today? Marine Pollution Bulletin. Volume 151:110813.
20. Nicolae, F., Perkovic, M., Ristea, M., Cotorcea, A. (2016). Method for monitoring the space-Time development of oil spilled in marine environment using PISCES II simulation software. Journal of Environmental Protection and Ecology, 17(1): 136-145.

21. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. *Scientific Bulletin of Naval Academy* 19(1): 85-90.
22. Perkovic M., Greidanus H., Muellenhoff O., Ferraro G., Pavlakis P., Cosoli S. and Harsch R. (2010). Marine polluter identification: Backtracking with the aid of satellite imaging, *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 19, No 10b, pp. 2426-2432.
23. Perkovic M., Sitkov A. (2008). Oil spill modeling and combat. *Maritime industry, ocean engineering and coastal resources - proceedings of the 12th international congress of the international maritime association of the Mediterranean*, IMAM 2007: 1161-1169.
24. K Łazuga, L Gucma. (2016). Genetic algorithm method for solving the optimal allocation of response resources problem on the example of polish zone of the Baltic Sea. *Journal of KONBiN* 2(38): 291-310.
25. K Łazuga, L Gucma, M Perkovic. (2018). The model of optimal allocation of maritime oil spill combat ships. *Sustainability* 10 (7), 2321.
26. Батанина Е.А., Бородин А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 4-1 (50). С. 161-168.
27. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Совершенствование прогнозирования разливов нефти от подводных источников. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. Т. 1. № 2 (53). С. 106-117.

References

1. Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Ekaterina A. Batanina, Viktor S. Naumov. Risk assessment of transport accidents on rivers in the borders of the republic of Tatarstan. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 V.2. pp. 79-84.
2. Plastinin A. E. Assessment of the expected damage to water bodies during oil spills. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. 2013. No. 1 (20). pp. 97-104.
3. Borodin A. N. Improvement of simulator training for the elimination of oil spills during the operation of vessels on inland waterways. *Science and sustainable development of society. The legacy of V. I. Vernadsky*. 2009. No. 9. pp. 259-260.
4. Plastinin A. E. Assessment of pollution during an oil spill on the water surface. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. 2013. No. 2. pp. 129-135.
5. Valery I. Reshnyak, Andrey E. Plastinin, Viktor S. Naumov, Anatoliy S. Slyusarev. The application of ozone in the processes of oil-containing bilge water purification. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 V.2. pp. 168-173.
6. Plastinin A. E. Assessment of the risk of transport accidents. *River transport (XXI century)*. 2013. No. 3 (62). pp. 83-88.
7. Valery I. Reshnyak, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Nikolai St. Otdelkin. Ecological support of water tourism. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 V.2. pp. 154-160.
8. Plastinin A. E. Assessment of the amount of damage caused to the soil during oil spills from ships. *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the Sea and River Fleet*. 2015. No. 3 (31). pp. 74-83.
9. Shmatkova E. Yu., Plastinin A. E., Baldenkov A. P., Borodin A. N. Assessment of the impact of oil spills on environmentally sensitive areas in the Pechora basin. In the collection: *Great Rivers-2020. Proceedings of the 22nd International Scientific and Industrial Forum*. 2020. p. 18.
10. Olga L. Domnina, Vasily N. Zakharov, Nikolai S. Otdelkin, Andrey E. Plastinin. Environmental risk assessment of accidents on water objects. *Marine intellectual technologies*. 2018. № 4 (42) V.2. pp. 79-86.
11. Plastinin A. E. Methodology of forecasting and eliminating the consequences of environmental pollution in oil spills. In the collection: *Great Rivers ' 2014. Proceedings of the Congress of the 16th International Scientific and Industrial Forum: in 3 volumes*. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. pp. 124-127.
12. Reshnyak V. I. Assessment of the level of environmental hazard of sources of emergency oil spills. *Operation of maritime transport*. 2020. № 4 (97). P. 72-76.
13. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Wahrenndorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment? *Marine Pollution Bulletin*, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.
14. Leiger, R., Aps, R., Fetissoff, M., Herkül, K., Kopti, M., Kotta, J., Mander, Ü., Suursaar, Ü. (2009). Oil accident response simulation: Allocation of potential places of refuge. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 126: 247-258.
15. Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Nikolai S. Otdelkin. Modeling of oil floating from underwater sources, in ice conditions. *Marine intellectual technologies*. 2018. № 4 (42) V.2.. pp. 87-91.
16. Acir, O., Aps, R., Fetissoff, M., Sert, M. (2011). Environmental impact assessment based on a potential oil spill scenario: Eastern Black Sea coastal zone, Turkey. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 149: 273-283.
17. Pocora, A., Purcarea, A.A., Nicolae, F., Cotorcea, A. (2018). Modelling and simulation of oil spills in coastal waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 172(1), 012012.
18. K Łazuga, L Gucma, M Perkovic. (2013). M/t "Baltic Carrier" accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 36(108) z. 1 pp. 110–115.
19. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydın Şihmantepe, Murat Selçuk Solmaz. (2020). A case study on oil pollution in Istanbul Strait: Revisiting 1994 Nassia tanker accident by utilising Potential Incident Simulation Control and Evaluation System (PISCES-II) simulation. What would be different in terms of response if Nassia accident happened today? *Marine Pollution Bulletin*. Volume 151:110813.

20. Nicolae, F., Perkovic, M., Ristea, M., Cotorcea, A. (2016). Method for monitoring the space-Time development of oil spilled in marine environment using Pisces II simulation software. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 17(1): 136-145.
21. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. *Scientific Bulletin of Naval Academy* 19(1): 85-90.
22. Perkovic M., Greidanus H., Muellenhoff O., Ferraro G., Pavlakis P., Cosoli S. and Harsch R. (2010). Marine polluter identification: Backtracking with the aid of satellite imaging, *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 19, No 10b, pp. 2426-2432.
23. Perkovic M., Sitkov A. (2008). Oil spill modeling and combat. *Maritime industry, ocean engineering and coastal resources - proceedings of the 12th international congress of the international maritime association of the Mediterranean, IMAM 2007*: 1161-1169.
24. K Łazuga, L Gucma. (2016). Genetic algorithm method for solving the optimal allocation of response resources problem on the example of polish zone of the Baltic Sea. *Journal of KONBiN* 2(38): 291-310.
25. K Łazuga, L Gucma, M Perkovic. (2018). The model of optimal allocation of maritime oil spill combat ships. *Sustainability* 10 (7), 2321.
26. Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin. Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan. *Marine intellectual technologies*. 2020. № 4 part 1. pp. 161-168.
27. Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Natalia S. Rodina Improving the forecasting of oil spills from underwater sources. *Marine intellectual technologies*. 2021. № 2 part 1. pp. 106-117.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Екатерина Александровна Батанина, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ea-batanina@yandex.ru

Ekaterina A. Batanina, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: ea-batanina@yandex.ru

Ольга Леонидовна Домнина, кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Olga L. Domnina, Ph.D.(Eng), Associate Professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Поступила в редакцию: 14.07.2021
Принята к публикации: 15.09.2021

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 656.61.052 (075)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.023>

Управление судном в штормовых условиях

Д.А. Скороходов^{1,2}, e-mail: skorohodda@mail.ru, Ю.Е. Крылов¹, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru,
А.Л. Стариченков², e-mail: alstar72@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

Аннотация. Приведены выражения для определения периодов собственных поперечных и продольных колебаний судна, как точные, так и приближённые, но в тоже время достаточные для их практического использования на судне. Представлены формулы для расчёта поперечной метацентрической высоты после принятия груза судном перед выходом в море. Выведены формулы для определения критических зон резонансной качки по крену и дифференту, как по скорости судна, так и по курсовому углу по отношению к направлению распространения штормового волнения моря. Представлены формулы для определения кажущегося периода встречи судна с волной, которые являются основой для расчёта резонансных зон. Выведенные соотношения для определения зоны резонанса по скорости судна при заданном курсовом угле и по курсовому углу при заданной скорости судна представлены при условии известного периода штормового волнения моря и курсового угла судна по отношению к направлению распространения волнения моря. Приведены формулы для определения амплитуды качки в условиях резонанса, если отношение периода собственных колебаний судна к кажущемуся периоду волны находится в пределах 0,7 – 1,3. Представлены выражения для определения амплитуд качки по крену и дифференту, вызывающие морскую болезнь у персонала, а также критические значения боковых перегрузок, влияющих на правильность его действия.

Ключевые слова: волнение, дифферент, кажущийся, колебания, крен, курсовой угол, период, скорость, собственный, шторм.

Ship control in storm conditions

Dmitriy A. Skorokhodov^{1,2}, e-mail: skorohodda@mail.ru, Yuriy E. Krylov¹, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru,
Aleksy L. Starichenkov², e-mail: alstar72@yandex.ru

¹Institute of transport problems N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation,

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. Expressions for determining the periods of the natural transverse and longitudinal vibrations of the vessel, both exact and approximate, are given, but at the same time sufficient for their practical use on the vessel. The formulas for calculating the transverse metacentric height after the cargo has been accepted by the vessel before going to sea are presented. Formulas are derived for determining the critical zones of resonant pitching in terms of roll and trim, both in terms of the ship's speed and in the heading angle in relation to the direction of propagation of storm waves of the sea. The formulas for determining the apparent period of the ship's meeting with the wave are presented, which are the basis for calculating the resonance zones. The derived relations for determining the resonance zone by the speed of the vessel at a given heading angle and by the heading angle at a given speed of the vessel are presented under the condition of a known period of stormy sea waves and the heading angle of the vessel in relation to the direction of propagation of sea waves. Formulas are given for determining the amplitude of pitching under resonance conditions if the ratio of the period of natural oscillations of the vessel to the apparent period of the wave is within 0.7 - 1.3. Expressions for determining the amplitudes of roll and pitch that cause motion sickness in personnel, as well as the critical values of lateral g-forces that affect the correctness of its action, are presented.

Keywords: excitement, trim, apparent, fluctuations, roll, heading angle, period, speed, proper, storm.

Введение

Вопрос о выборе безопасных курсов и скоростей возникает для всех судов, находящихся в штормовых условиях. Судоводитель вынужден намеренно изменять курс или скорость хода с того момента, когда вследствие усиленной качки, зарывания в воду или других причин, обусловленных ветром и волнением, судно теряет возможность идти заданным курсом с оборотами винта, соответствующими нормальной эксплуатационной скорости. Для того чтобы эти изменения не увеличивали угрожающую судну опасность и были наиболее эффективными, необходимо, прежде всего, определить неблагоприятные сочетания курсов и скоростей, соответствующих резонансному режиму бортовой и килевой качки. Избегая таких

сочетаний, можно выдержать шторм, не подвергая судно излишней опасности.

Проблема безопасности управления судном в штормовых условиях остается нерешенной до настоящего времени. Впервые этому вопросу было уделено внимание в работах [1 и 2], и только в работе [3] были выполнены практические исследования в этом направлении и разработаны номограммы для использования на судах в штормовых условиях. Однако, как показал опыт, в большинстве случаев практическое использование номограмм было затруднено и поэтому они не нашли широкого применения. В работах [4 и 5] были сделаны первые шаги в разработке информационной поддержки судоводителя, позволяющие упростить процесс выбора оптимальных курса и скорости в штормовых условиях.

Однако только последние достижения в получении в онлайн режиме объективных данных о параметрах штормового волнения моря и использовании их в совокупности с исходными данными о параметрах судна, введенными в порту перед выходом в море в бортовое вычислительное устройство, позволяют автоматически алгоритмизировать выбор безопасных курса и скорости в штормовых условиях. При этом участие судоводителя ограничивается только использованием рекомендаций, выработанных вычислительным устройством.

1. Определение периода собственных поперечных колебаний судна

Период собственных поперечных колебаний судна, $T_{C\theta}$, определяется по формуле (1) [1]:

$$T_{C\theta} = 2\pi \sqrt{\frac{J_x + \Delta J_x}{Dh}}, \quad (1)$$

где: J_x – поперечный момент инерции масс судна, т/м²;

ΔJ_x – поперечный момент инерции присоединенных масс воды, т/м²;

D – весовое водоизмещение судна, т;

h – начальная поперечная метацентрическая высота, м.

Для получения общего момента инерции, $J_x + \Delta J_x$, можно воспользоваться выражением (2) [1]:

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

где: B – ширина судна, м;

α – коэффициент полноты ватерлинии;

C_B – коэффициент общей полноты;

H – высота борта, м.

На основании формулы (2) для ряда транспортных судов построен график бортовой качки, входящий в диаграмму контроля и регулирования нагрузки судов, предложенную Г.Е. Павленко [1, 2]. Этот график показывает значения периода $T_{C\theta}$ для любого варианта загрузки судна. При отсутствии такого графика величина $T_{C\theta}$, (с), может быть приближенно вычислена по формуле:

$$T_{C\theta} = \frac{f \cdot B}{\sqrt{h}}, \quad (3)$$

где: f – коэффициент, который приближенно может быть принят равным 0,8;

B – ширина судна, м;

h – начальная поперечная метацентрическая высота, м.

Вычислить метацентрическую высоту судна, h , после погрузки перед выходом судна в море можно по формуле

$$h = h_0 + \Delta h, \quad (4)$$

где: h_0 – метацентрическая высота порожнего судна, известная из документации, м;

Δh – изменение метацентрической высоты судна после выполнения операции погрузки, м; определяемое по формуле:

$$\Delta h = \frac{m}{D+m} \cdot \left(d + \frac{m}{200 \cdot q} - Z_P - h_0 \right), \quad (5)$$

где: m – масса принятого груза, т;

d – осадка судна до начала грузовых операций, м;

q – число тонн на 1 см осадки;

Z_P – расстояние между центром тяжести и килем порожнего судна, м;

2. Вычисление границ периода поперечных колебаний судна до и после резонансной зоны

Как известно, при движении судна в условиях волнения моря кажущаяся частота встречи судна с волной, ω_K , определяется формулой (6):

$$\omega_K = \omega_B + \frac{\omega_B^2}{g} \cdot V_C \cdot \cos \varphi_C, \quad (6)$$

где: ω_B – частота волнения моря, 1/с;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

V_C – скорость судна при движении заданным курсом, м/с;

φ_C – курсовой угол встречи судна с генеральным направлением бега волн, град.

Анализ соотношения (6) показывает, что при движении судна лагом к волне $|\varphi_C| = 90^\circ$, истинная – ω_B и кажущаяся – ω_K частоты совпадают. Если судно движется навстречу волне, $0 \leq |\varphi_C| < 90^\circ$, то кажущаяся частота волнения оказывается больше истинной. Более сложная зависимость оказывается при движении судна по волне. В этом случае возможны такие условия движения, при которых попутное волнение имеет нулевую кажущуюся частоту $\omega_K = 0$. Это происходит при совпадении скорости волны, V_B , и скорости судна, V_C : $V|\cos \varphi_C| = V_B$, когда их взаиморасположение сохраняется без изменения. При других скоростях движения судно может отставать от волны: $V|\cos \varphi_C| < V_B$ или обгонять ее: $V|\cos \varphi_C| > V_B$.

В первом случае частота волнения лежит в диапазоне $0 < \omega_K < \frac{1}{a}$ и кажущаяся частота оказывается меньше истинной. Во втором случае частота волнения лежит в области $\omega_K > \frac{1}{a}$ и кажущаяся частота превосходит истинную.

Преобразуем выражение (6), выразив частоту через период колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и запишем его относительно кажущегося периода встречи судна с волной, T_K , с:

$$T_K = \frac{T_B^2 \cdot g}{gT_B + 2\pi \cdot V_C \cdot \cos\varphi_C}, \quad (7)$$

где: T_B – период штормового волнения моря, с.

Таким образом, при движении судна заданным курсом в штормовых условиях со скоростью V_C кажущийся период встречи судна с волной T_K можно вычислить по данным навигационной станции о периоде штормового волнения моря T_B и генеральном направлении бега волн, определив курсовой угол встречи судна с данным направлением – φ_C .

При полученном курсовом угле встречи судна с генеральным направлением бега волн φ_C можно определить границы скорости судна до $V_{C(0,7)}$ и после $V_{C(1,3)}$ резонансной зоны колебаний судна на волне.

Вычисляем границу скорости до резонансной зоны $V_{C(0,7)}$:

При $V_{C(0,7)}$ отношение $\frac{T_{C\theta}}{T_K} = 0,7$.

Тогда из выражения (7) следует:

$$T_{C\theta} = 0,7 \cdot \frac{T_B^2 \cdot g}{g \cdot T_B + 2\pi \cdot V_{C(0,7)} \cdot \cos\varphi_C},$$

или:

$$V_{C(0,7)} = \frac{0,7 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\theta} \cdot \cos\varphi_C} = \frac{1,095 \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{T_{C\theta} \cdot \cos\varphi_C}, \quad (8)$$

Аналогично вычисляем границу скорости после резонансной зоны $V_{C(1,3)}$:

При $V_{C(1,3)}$ отношение $\frac{T_{C\theta}}{T_K} = 1,3$, тогда

$$V_{C(1,3)} = \frac{1,3 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\theta} \cdot \cos\varphi_C} = \frac{2,033 \cdot (T_B^2 - T_{C\theta} \cdot T_B)}{T_{C\theta} \cdot \cos\varphi_C}, \quad (9)$$

По полученным данным о периоде штормового волнения моря T_B (длине волны λ_B) и направлению распространения волнения моря (курсовом угле судна по отношению к полученному направлению волн φ_C), отношение периода собственных колебаний судна к кажущемуся периоду встречи судна с волной $T_{C\theta} / T_K$ при известной скорости судна V_C определяется выражением (10) [2, 3]:

$$\frac{T_{C\theta}}{T_K} = \frac{T_{C\theta} \cdot (1,25 \cdot \sqrt{\lambda_B} + 0,514 \cdot V_C \cdot \cos\varphi_C)}{\lambda_B}, \quad (10)$$

где: V_C - скорость судна в узлах, λ_B - длина волны в метрах.

Если отношение $T_{C\theta} / T_K$ находится в пределах 0,7 – 1,3, то качка будет происходить в условиях резонанса с амплитудой качки θ , вычисляемой по формуле (11):

$$\theta = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{mq} \cdot J_X}{0,0015 \cdot L \cdot B^4 + 0,4 \cdot S \cdot b^3}}, \quad (11)$$

где:

S – суммарная площадь обоих скуловых килей, м²;

b – расстояние от скулового киля до центра тяжести судна, м. Если судно без скуловых килей, принимается $b = 0$.

α_{mq} – приведённый угол волнового склона,

$\alpha_{mq} = \alpha_0 \cdot k_{m\theta} \cdot \sin\varphi_C$, $\alpha_0 = 3,14 \cdot \frac{h_B}{\lambda_B}$ – угол

волнового склона, радианы;

h_B – высота волны, м;

$k_{m\theta}$ – коэффициент, учитывающий влияние осадки судна на амплитуду возмущающей силы (выбирается из таблицы по коэффициенту вертикальной полноты и отношению осадки судна к длине волны).

3. Оптимизация параметров бортовой качки судна

От расположения грузов на судне зависят и период, и амплитуда бортовой качки. Поэтому при составлении грузового плана стремятся придать судну такую остойчивость, при которой качка была бы наиболее благоприятной.

Считается, что качка может быть достаточно плавной, если $\frac{h}{B}$ не превышает 0,05.

С учётом реальных условий эта величина может значительно колебаться в зависимости от типа судна [7]. При увеличении метацентрической высоты h уменьшается период собственных колебаний судна T и соотносится с амплитудой качки θ примерно по такому закону:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} \approx \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2. \quad (12)$$

На человека наиболее существенное влияние оказывают вертикальные линейные ускорения. При бортовой качке они складываются из ускорений от самой бортовой качки и от вертикальной. Основной причиной укачивания личного состава является физиологическое влияние на человеческий организм угловых и линейных ускорений, возникающих при качке корабля. Порог чувствительности у людей к угловым ускорениям находится в пределах 2-3 °/с², а к вертикальным 0,4-0,12 м/с² [8]. Особенно интенсивно «морская болезнь» развивается, когда вертикальные ускорения достигают примерно 0,1 g ≈ 1 м/с².

Вертикальные ускорения в данной точке корабля являются следствием не только линейных, но и угловых колебаний. Наибольшие вертикальные ускорения бывают в оконечностях корабля. Допустимые амплитуды бортовой качки θ_{max} , при которых вертикальные ускорения не превышают 0,1 g, соответствуют условиям (13) [8]:

$$\theta_{max} \leq \theta = 0,1 g \cdot \left(\frac{T_\theta}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2}{B} \cdot 57,3^\circ, \quad (13)$$

где: T_θ – период бортовой качки,

B – наибольшая ширина судна.

Кроме «морской болезни», качка корабля также влияет на способность персонала выполнять различные задачи из-за потери равновесия.

Исследования потерь времени, вызванных потерей равновесия членами команды из-за качки, проведенные в центре им. Д. Тейлора [8], позволили получить универсальный показатель, обозначенный как *MII* (*Motion Induced Interruptions*).

Фактически *MII* представляет собой функцию, отражающую состояние равновесия членов команды. *MII* характеризует возникновение условий, когда человек должен неизбежно либо ухватиться за

что-нибудь, либо изменить позу для удержания равновесия.

В качестве приближенного показателя *MII* используют «оценочный показатель» поперечной силы *LFE* (*Lateral Force Estimator*) или боковые перегрузки. Предложено боковые перегрузки разделить на несколько степеней риска.

Первый уровень риска соответствует $LFE = 0,08 g$.

При таком уровне качки однократная потеря равновесия приходится на 18 операций, осуществленных членом экипажа на верхней палубе корабля.

Второй уровень риска соответствует $LFE = 0,1 g$. Потеря равновесия при этом приходится уже на каждые 2-е выполняемые операции.

Серьезный уровень риска – потеря равновесия 1,44 раза на одну операцию, $LFE = 0,12 g$.

Высокий уровень риска – 2,61 раза потери равновесия на одну операцию $LFE = 0,14 g$.

Чрезвычайно опасные условия – 4 раза потеря равновесия на одну операцию, $LFE \geq 0,16 g$.

Для пассажирских судов желательно, чтобы качка не вызывала слишком сильных симптомов «морской болезни» у пассажиров.

Это условие будет соблюдено, если

$$\theta^\circ \leq 2,85 \cdot \frac{B \cdot c^2}{h}, \quad (14)$$

где: θ° – амплитуда бортовой качки, град.;

c – коэффициент, зависящий от типа судна и его загрузки (от 0,76 до 0,81);

B – ширина судна, м;

h – метацентрическая высота, м.

4. Продольная качка судна

Период собственных продольных колебаний судна $T_{C\psi}$ определяется формулой (15) [3, 4]

$$T_{C\psi} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_y + \Delta J_y}{D \cdot H}}, \quad (15)$$

где: J_y – продольный момент инерции масс судна, т/м²;

ΔJ_y – продольный момент инерции присоединённых масс воды, т/м²;

D – весовое водоизмещение, т;

H – продольная метацентрическая высота, м.

Формула (15) является точной для судна, симметричного относительно миделя и сидящего на ровном киле. Вместе с тем она даёт хорошие результаты и для судов, обладающих незначительной асимметричностью и имеющих небольшой дифферент.

Пренебрегая крайне незначительной разницей между продольной метацентрической высотой H и продольным метацентрическим радиусом R принимаем:

$$D \cdot H \approx D \cdot R = \rho \cdot g \cdot J_0, \quad (16)$$

где: ρ – массовая плотность воды;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести;

J_0 – продольный момент инерции площади ватерлинии.

Тогда выражение (15) с учетом (16) принимает вид:

$$T_{C\psi} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_y + \Delta J_y}{\rho \cdot g \cdot J_0}}. \quad (17)$$

Для точного вычисления моментов инерции необходимо иметь теоретический чертёж и масштаб Бонжана и знать характер распределения веса судна со всеми грузами по 20 теоретическим шпациям. Поэтому в практическом случае можно применить простой способ определения $T_{0\psi}$, дающий достаточно высокую точность.

Продольный момент инерции можно, следуя Г.Е. Павленко, представить в виде (18) [1, 2]:

$$J_y = 0,065 \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \delta \cdot L^3 \cdot B \cdot T, \quad (18)$$

где: α – коэффициент полноты ватерлинии;

δ – коэффициент полноты водоизмещения (коэффициент общей полноты);

L – длина судна;

T – средняя осадка.

Продольный момент инерции площади ватерлинии J_0 и момент инерции присоединённых масс воды ΔJ_y могут быть определены по следующим приближённым выражениями (19) и (20), полученными заменой истинного обвода ватерлинии параболической кривой:

$$J_0 = \frac{L^3 \cdot B}{12} \cdot \frac{\alpha}{\delta - 2 \cdot \alpha}; \quad (19)$$

$$\Delta J_y = a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{\pi}{48} \cdot \rho \cdot L^3 \cdot B \cdot \frac{\alpha^2}{(3 - \alpha) \cdot (3 - 2\alpha)} \quad (20)$$

где: a_1 и a_2 – коэффициенты, первый из которых зависит от отношения L/B , а второй от коэффициента вертикальной полноты судна и незначительно от отношения B/T .

При реально существующих соотношениях размерений судна и коэффициентов его полноты произведение $a_1 \cdot a_2$ для морских транспортных судов можно принимать, равным единице.

На основании выражений (17–20), получим следующую простую и удобную для практических

расчётов периода собственных продольных колебаний судна $T_{C\psi}$ формулу:

$$T_{C\psi} = 1,77 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{3 - \alpha} \cdot B + T \cdot \delta(3 - 2\alpha)}, \quad (21)$$

которая может быть представлена в виде:

$$T_{C\psi} = k \cdot \sqrt{T}, \quad (22)$$

$$\text{где } k = 1,77 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{3 - \alpha} \cdot \frac{B}{T} + \delta(3 - 2\alpha)}.$$

Аналогично определению границ скорости судна до и после резонансной зоны его колебаний на штормовой волне для бортовой качки, определим эти границы и для килевой качки.

Вычисляем границу скорости до резонансной зоны $V_{C(0,7)}$:

$$\text{При } V_{C(0,7)} \text{ отношение } \frac{T_{C\psi}}{T_K} = 0,7$$

Тогда из выражения (7) следует:

$$T_{C\psi} = 0,7 \cdot \frac{T_B^2 \cdot g}{g \cdot T_B + 2\pi \cdot V_{C(0,7)} \cdot \cos \varphi_C},$$

или

$$V_{C(0,7)\psi} = \frac{0,7 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C} = \frac{1,095 \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C}, \quad (23)$$

Аналогично вычисляем границу скорости после резонансной зоны $V_{C(1,3)}$:

$$\text{При } V_{C(1,3)} \text{ отношение } \frac{T_{C\psi}}{T_K} = 1,3, \text{ тогда}$$

$$V_{C(1,3)} = \frac{1,3 \cdot g \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{2\pi \cdot T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C} = \frac{2,033 \cdot (T_B^2 - T_{C\psi} \cdot T_B)}{T_{C\psi} \cdot \cos \varphi_C}. \quad (24)$$

Как отмечалось выше для бортовой качки, допустимые амплитуды килевой качки ψ_{max} , при которых вертикальные ускорения, вызывающие морскую болезнь, также не должны превышать $0,1 g$, соответствуют условиям (25):

$$\psi_{max} \leq \psi = 0,1 g \cdot \left(\frac{T_{\psi}}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{2}{L} \cdot 57,3^\circ, \quad (25)$$

где: T_ψ – период килевой качки,
 L – наибольшая длина судна.

Период килевой качки можно определить [3] по следующей формуле:

$$T_\psi \approx 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2J_y}{D \cdot H_0}} \approx 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1,96 \cdot C_B \cdot d}{g \cdot \alpha}}, \quad (26)$$

где: H_0 – продольная метацентрическая высота, м;

J_y – момент инерции массы судна относительно поперечной оси, т/м²;

C_B – коэффициент общей полноты;

α – коэффициент полноты ватерлинии;

d – осадка судна, м;

D – водоизмещение судна, т.

При отсутствии точных данных значения указанных величин можно получить по приближенным формулам:

$$J_y \approx 0,07 \cdot \frac{\alpha}{9,81} \cdot D \cdot L^2; \quad (27)$$

$$H_0 \approx \frac{\alpha^2 \cdot L^2}{14 \cdot C_B \cdot d}. \quad (28)$$

Помимо скорости движения судна и угла встречи с волной на интенсивность волнового воздействия влияют соотношения геометрических размеров судна и длины волны. При движении судна перпендикулярно гребню волны (встречно или попутно) изменение дифферента совпадает с углом волнового склона $\gamma(t)$, если длина судна существенно меньше половины длины волны $2L \leq \lambda$. По мере роста отношения L/λ амплитуда дифферента судна уменьшается при неизменной амплитуде угла волнового склона. Аналогичный эффект уменьшения амплитуды угла крена в зависимости от отношения ширины судна к длине волны B/L имеет место при поперечном волнении. На ослабление качки также влияет осадка

судна. Иные геометрические соотношения существуют при движении судна под некоторым углом φ к направлению бега волн. В этом случае амплитуда угла дифферента судна определяется продольной составляющей угла волнового склона, а амплитуда угла крена поперечной составляющей угла волнового склона [1, 2]. Под преобладающими волнами здесь понимается главная гармоника волнения, соответствующая пику его спектра. На эту гармонику приходится максимум энергии волн.

Заключение

Современные суда оснащены системой мониторинга параметров волнения моря, которая предоставляет текущие и прошлые значения следующих параметров волнения: высоты $h_{1/3}$ значительных волн; высоты $h_{3\%}$ максимальных волн (высота волн 3% обеспеченности: $h_{1/3} = 0,75h_{3\%}$); среднего периода волнения; периода преобладающих волн; скорости и направления бега преобладающих волн; длины преобладающих волн.

Использование этих данных в совокупности с исходными данными о параметрах судна, введенными в бортовое вычислительное устройство в порту перед выходом в море дает возможность разработать алгоритм автоматического расчёта следующих динамических параметров судна в штормовых условиях: собственный период качки судна, критические значения амплитуды качки по крену и дифференту, безопасные скорость и курсовой угол по отношению к направлению распространения штормового волнения моря.

Полученные расчётные данные дадут возможность обеспечить информационную поддержку судоводителю по недопущению критических значений скорости судна, его курсового угла на волне, углов по крену и дифференту для обеспечения сохранности груза и комфортных условий обитания на судне (снижение вероятности морской болезни).

Технический уровень современных процессорных систем управления скоростью и курсом судов без труда обеспечит реализацию предлагаемого алгоритма автоматического определения оптимальных курса и скорости судна в штормовых условиях, исключающих попадание его в резонанс с волнением моря, как по бортовой, так и по килевой качке. Эти расчётные данные могут быть использованы в качестве рекомендаций судоводителю для управления судном в штормовых условиях.

Литература

1. Павленко Г.Е. Качка судов. ОГИЗ. Водтрансиздат.1939.
2. Павленко Г.Е. Теория и расчет продольной качки корабля. Ленинградский кораблестроительный институт.1939.
3. Ю.В. Ремез. О выборе курса и скорости судна при шторме. Издательство «Морской транспорт», М.: - 1967.
4. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов. Справочник по теории корабля. Судпромгиз, Ленинград, 1960.
5. Д.А. Скороходов. Принципы безопасного маневрирования в штормовых условиях. (Е.А. Овчинникова, Д.А. Скороходов), Известия Санкт-Петербургского электротехнического университета (ЛЭТИ), 8/2009, СПб, 2009. №8. С. 9-14.
6. Д.А. Скороходов, «Разработка алгоритма безопасного маневрирования судна в штормовых условиях», (Е.А. Овчинникова, Д.А. Скороходов), В сборнике Навигация и управление движением. Материалы У11

конференции молодых ученых. Плод общей редакции В.Г. Пешехонова ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», СПб, 2006. С. 199-205.

7. Справочник капитана дальнего плавания. Л.Р. Аксютин, В.М. Бондарь, Г.Г. Ермолаев и др.; под редакцией Г.Г. Ермолаева. – М.; Транспорт, 1988. – 248 с.
8. Ю.А. Лукомский, В.Г. Пешехонов, Д.А. Скороходов, Навигация и управление движением судов. Учебн./СПб.:ЭЛМОР, 2002.

References

1. Pavlenko G.Ye. Kachka sudov [Swaying of ships]. OGIZ. Vodtransizdat.1939.
2. Pavlenko G.Ye. Teoriya i rascht prodol'noy kachki korablya [Theory and calculation of the ship's pitching]. Leningradskiy korablestroitel'nyy institut.1939.
3. YU.V. Remez. O vybere kursa i skorosti sudna pri shtorme [On the choice of the course and speed of the vessel in a storm]. Izdatel'stvo «Morskoy transport», M.: - 1967.
4. YA.I.Voytkunskiy, R.YA.Pershits, I.A.Titov. Spravochnik po teorii korablya [Handbook of ship theory]. Sudpromgiz, Leningrad, 1960.
5. Skorokhodov D.A. Printsipy bezopasnogo manevrirovaniya v shtormovykh usloviyakh [Principles of safe maneuvering in stormy conditions]. (Ovchinnikova Ye.A., Skorokhodov D.A.), Izvestiya Sankt-Peterburgskogo elektrotekhnicheskogo universiteta (LETI), 8/2009, SPb, 2009. №8. S. 9-14.
6. Skorokhodov D.A., Razrabotka algoritma bezopasnogo manevrirovaniya sudna v shtormovykh usloviyakh [Development of an algorithm for safe maneuvering of a vessel in stormy conditions]. (Ovchinnikova Ye.A., Skorokhodov D.A.), V sbornike Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem. Materialy U11 konferentsii molodykh uchenykh. Plod obshchey redaktsii Peshekhonova V.G. GNTS RF TSNII «Elektropryor», SPb, 2006. S. 199-205.
7. Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya [Handbook of the sea captain]. L.R.Aksyutin, V.M.Bondar', G.G.Yermolayev i dr.; pod redaktsiyey G.G.Yermolayeva. – M.; Transport, 1988. – 248 s.
8. YU.A.Lukomskiy, V.G.Peshekhonov, D.A.Skorokhodov, Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem sudov [Navigation and ship traffic control]. Uchebn./SPb.:ELMOR, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: skorohodda@mail.ru

Юрий Евгеньевич Крылов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru.

Алексей Леонидович Стариченков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5. Тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: skorohodda@mail.ru

Yuriy E. Krylov, PhD (Eng), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru.

Alexey L. Starichenkov, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, Tel. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.05.2021
Принята к публикации: 12.06.2021

Синтез скалярной САУ частоты вращения вентильного двигателя для ГЭУ ледокола с движительно-рулевым комплексом «Азипод»

В.Е. Высоцкий¹ e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru, С.А. Конева¹ e-mail: ksa@mail.ru,
И.Ю. Марков¹ e-mail: markov.igor.ex@ya.ru, В.М. Цалоев¹ e-mail: 1._@mail.ru

¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. В статье рассматриваются основные тенденции развития систем судового автоматизированного электропривода с машинами переменного тока. В частности представлены варианты реализации электропривода с использованием частотно управляемых асинхронных двигателей и синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением. Предлагается перспективная электромеханическая система на основе вентильного двигателя для ГЭУ ледокола с движительно-рулевым комплексом «Азипод». Целью работы является исключение структурной сложности и повышения функциональных возможностей электропривода за счет применения скалярной САУ частоты вращения вентильного двигателя вместо векторной для ГЭУ. Новизна заключается в использовании подхода и представления вентильного двигателя как объекта регулирования на основе аналогии с коллекторным двигателем постоянного тока при регулировании положения его оси токосъема. В соответствии с этим анализ информационных процессов, связанных с процессами электромеханического преобразования энергии, протекающими в синхронной машине с позиционно-зависимым частотным управлением, и синтез САУ электропривода по принципу подчиненного регулирования базируются на тех подходах, которые широко используются в регулируемых электроприводах постоянного тока, обладающих наилучшими динамическими свойствами.

Ключевые слова: Движительно-рулевой комплекс «Азипод», ГЭУ, электропривод, вентильный двигатель, синхронная машина, управляемый вентильный коммутатор, позиционно-зависимое управление, скалярная САУ, синтез.

Synthesis of a scalar ACS of the valve motor rotational speed for the icebreaker's ERM with a propulsion-steering complex "Azipod"

Vitaly E. Vysotsky¹ e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru, Svetlana A. Koneva¹ e-mail: ksa@mail.ru,
Igor U. Markov¹ e-mail: markov.igor.ex@ya.ru, Vladimir M. Tsaloev¹ e-mail: 1._@mail.ru

¹ Sevastopol state University, Russian Federation

Abstract. The article discusses the main trends in the development of marine automated electric drive systems with AC machines. In particular, variants of the implementation of an electric drive using frequency-controlled asynchronous motors and synchronous motors with electromagnetic excitation are presented. A promising electromechanical system based on a valve engine for the icebreaker's ERM with the propulsion-steering system Azipod is proposed. The aim of the work is to eliminate the structural complexity and to increase the functionality of the electric drive by using a scalar ACS of the valve motor rotational speed instead of a vector one for the ERM.

The novelty lies in the use of the approach and representation of the valve motor as an object of regulation based on the analogy with the collector DC motor when regulating the position of its current collection axis. Thereby, the analysis of information processes related to the processes of electromechanical energy conversion occurring in a synchronous machine with position-dependent frequency control, and the synthesis of an ACS electric drive based on the principle of subordinate regulation are based on those approaches that are widely used in regulated DC electric drives possessing the best dynamic properties.

Keywords: Propulsion-steering complex "Azipod", electric rowing machine (ERM), electric drive, valve motor, synchronous machine, controlled valve switch, position-dependent control, Automatic Control System (ACS), synthesis.

Введение

Анализ современного состояния дел в области судового автоматизированного регулируемого электропривода показывает, что основными тенденциями его развития является использование принципов частотного регулирования. В его состав, как правило, входит управляемый силовой преобразователь на основе активного выпрямителя и автономного инвертора с независимым частотным управлением, а также вращающийся электромеханический преобразователь – машина переменного тока.

Приоритетными в этой области до сих пор являлись асинхронные машины [1], различные конструктивные модификации которых, в том числе двигатели с двухслойным ротором [2], обеспечивают надежную эксплуатацию при достижении удовлетворительных регулировочных характеристиках. Однако наиболее перспективной и

обеспечивающей существенный технологический скачок в развитии судовых электромеханических систем является модификация электропривода на основе вентильных двигателей (ВД). При этом одна из наиболее рациональных областей применения синхронных машин с управляемыми вентильными коммутаторами и позиционно зависимым частотным управлением – это судостроение. Именно здесь они могут найти широкое применение при создании ГЭУ мощных ледоколов нового поколения, технические требования к которым отличаются особой жесткостью в части надежности, экономичности и удельных массогабаритных показателей.

В настоящее время рядом зарубежных фирм разрабатываются электроприводы (ЭП) с вентильными двигателями для ГЭУ на основе принципов векторного управления. Векторные системы управления осуществляют регулирование в осях ротора синхронной машины ВД [3,4]. Эти системы управления применяются при высоких требованиях к

динамике электропривода, широкому диапазону регулирования частоты вращения, а также при высоких требованиях к его перегрузочной способности.

1. Векторная система управления как один из возможных вариантов для электропривода ГЭУ с синхронным двигателем

Векторные системы управления используются в электроприводах на основе синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением.

Одним из возможных способов построения регулируемых синхронных ЭП [5]. Способ основан на алгоритме векторного управления и заключается в том, что статический УВК, его система управления и датчик положения ротора, используемые в ВД, формируют фазные напряжения таким образом, что обобщенный вектор напряжения статора синхронной машины всегда ортогонален вектору магнитного потока, создаваемого обмоткой ротора. Это, в свою очередь, предоставляет возможность регулирования электромагнитного момента двигателя и, соответственно, частоты его вращения путем изменения величины обобщенного вектора фазного напряжения статора, а также обеспечивает устойчивую работу двигателя на любой синхронной частоте вращения из множества, входящего в диапазон регулирования.

Алгоритм векторного управления базируется на том, что система управления ЭП оперирует проекциями обобщенных векторов фазных напряжений и токов обмоток статора на оси системы координат U , V , которая вращается с синхронной скоростью и имеет ось U , совмещенную с вектором магнитного потока, создаваемого обмоткой ротора. Соответственно этому, ось V совпадает по направлению с обобщенным вектором напряжения статора. Иными словами, система управления оперирует не синусоидально изменяющимися величинами, а величинами, неизменными по знаку.

В указанной работе [5] анализируется возможность применения рассматриваемого способа в гребном ЭП движительно-рулевого комплекса типа «Азипод» СЭД ледокола, приводится функциональная схема электропривода ГЭУ с ВРК, в принцип действия которого заложен рассматриваемый способ.

В качестве электромеханического преобразователя в электроприводе с ВД используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением. Конструктивной особенностью последнего является наличие двух трехфазных обмоток размещенных на статоре, магнитные оси которых сдвинуты на 30 электрических градусов. Указанные обмотки получают питание от управляемого силового преобразователя (УСП), силовая часть которого, соответственно, содержит два преобразовательных канала.

2. Функциональная схема электропривода ГЭУ с вентильным двигателем на основе синхронной машины с электромагнитным возбуждением

Рассмотрим возможный принцип формирования одного из каналов УСП, содержащего управляемые выпрямитель, вентильный коммутатор на основе зависимого инвертора напряжения и позиционной системы управления с датчиком положения ротора (ДПР) [6].

На рис. 1 представлена функциональная схема электропривода на основе синхронной машины (СМ), УСП и системы управления, включающей в себя ДПР [7].

В соответствии с функциональной схемой в состав электропривода ГЭУ входят:

- синхронная машина с электромагнитным возбуждением СМ;
- управляемый выпрямитель УВ;
- управляемый вентильный коммутатор УВК;
- тиристорный возбудитель ТВ;
- датчик положения ротора ДПР;
- датчик частоты вращения ДЧВ;
- система импульсно-фазового управления выпрямителем СИФУ УВ;
- система позиционно-зависимого управления ключами полупроводникового коммутатора, СУ УВК.

Анализ процессов электромеханического преобразования энергии, протекающих в синхронной машине, и синтез САУ электропривода по принципу подчиненного регулирования с последовательной коррекцией базируются на тех подходах, которые широко используются в регулируемых ЭП постоянного тока, обладающих наилучшими динамическими свойствами.

Рассматриваемый электропривод ГЭУ представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования с положительной обратной связью по положению ротора и отрицательной обратной связью по частоте вращения. Во всех режимах работы электропривод ГЭУ работает при постоянстве магнитного потока, создаваемого обмоткой ротора, которая получает питание от ТВ.

При переходе электропривода в режим динамического торможения, который возникает в случаях, когда напряжение на входных клеммах УВК и, соответственно, на обкладках конденсатора С превышает напряжение на выходе УВ, последний закрывается. В этом режиме, как указывается в работе [7] периодически включается и выключается транзисторный ключ VSt , в результате чего энергия, запасенная в ГЭД, рассеивается на резисторе Rt . Интенсивность торможения зависит от величины сопротивления этого резистора. Электропривод ГЭУ, выполненный в соответствии с рассматриваемой функциональной схемой, целесообразно использовать в ГЭУ мощностью до 6,5 МВт и напряжением до 4000 В. Целесообразная область применения рассматриваемого электропривода – это ГЭУ ледоколов полярного класса и судов ледового плавания.

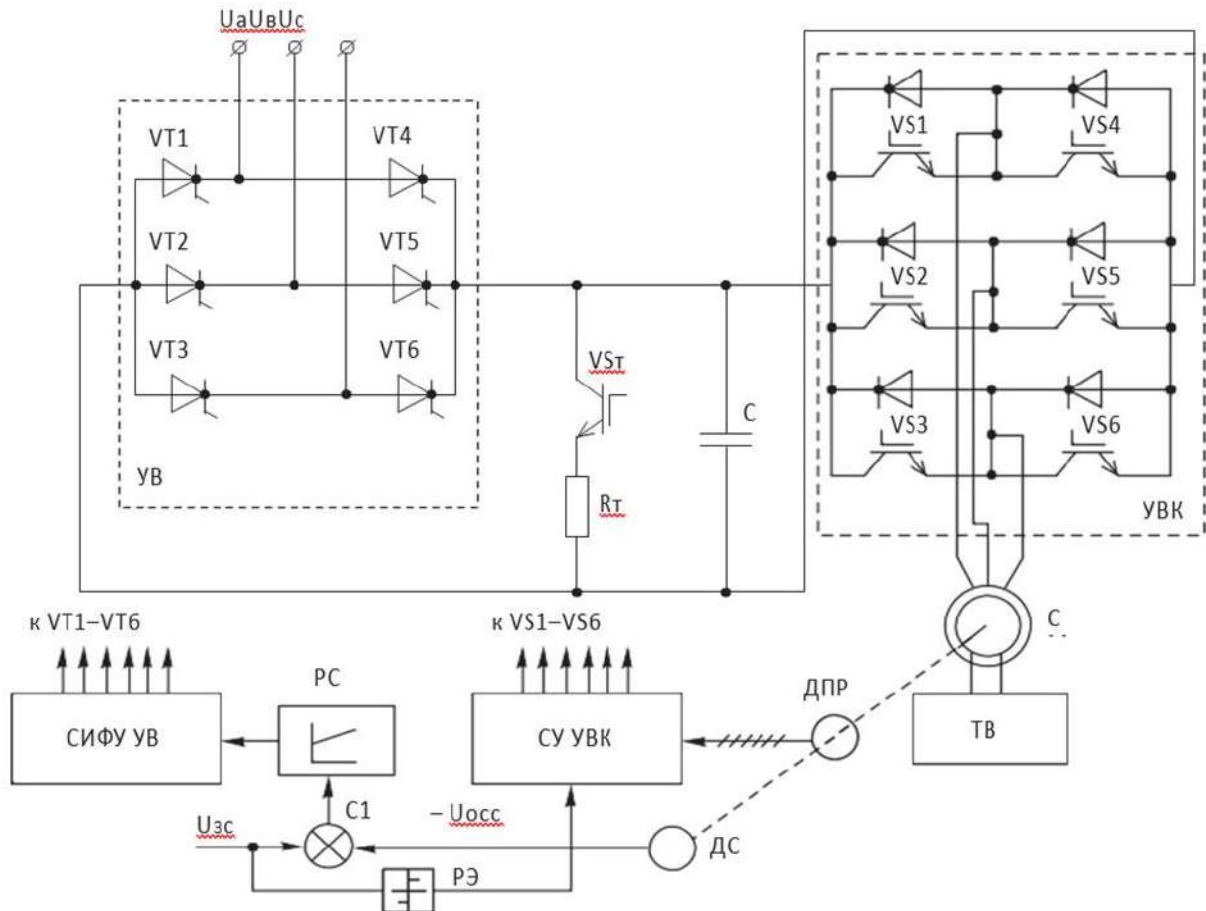


Рис. 1. Функциональная схема электропривода ГЭУ с вентильным двигателем на основе синхронной машины с электромагнитным возбуждением и УСГ, содержащего управляемый выпрямитель и коммутатор по схеме зависимого инвертора напряжения с позиционной системой управления

3. Перспективная скалярная система управления электроприводом ГЭУ с вентильным двигателем

При построении САУ электропривода с ВД могут быть реализованы и иные, в частности, изложенные в работах [8,9], принципы подчиненного регулирования.

Приоритетными в этой области до сих пор являлись асинхронные машины. В том числе, зачастую нет необходимости в использовании векторного способа управления синхронными машинами при реализации принципа позиционно-зависимой коммутации и модуляции в системе ВД. Существо этого принципа заключается в том, что при его реализации ортогональность обобщенного вектора напряжения статора вектору магнитного

потока, создаваемого обмоткой ротора может быть соблюдена автоматически.

В работе [10] показано, что при использовании аналогии с коллекторными машинами постоянного тока ВД с таким позиционным управлением может быть классифицирован как двигатель с полупроводниковым коллектором 3-го типа.

Как объект регулирования ВД представляется последовательным соединением трех динамических звеньев направленного действия – форсирующего (рис. 2а), колебательного или двойного аperiодического (рис 2.б) и интегрирующего [11].

При питании управляемого вентильного коммутатора от активного выпрямителя ВД характеризуется передаточной функцией по управляющему воздействию вида (1):

$$W(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{\Delta U_a(p)} = \frac{K_{ВП} K_{Д} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]}{(T_{\mu}p + 1) \{ [(T_a T_f - T_{af} T_{fa})p^2 + (T_a + T_f + T_{af} \frac{E_0}{\Delta U_f^0})p + 1] T_M p + (T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1 \}}, \quad (1)$$

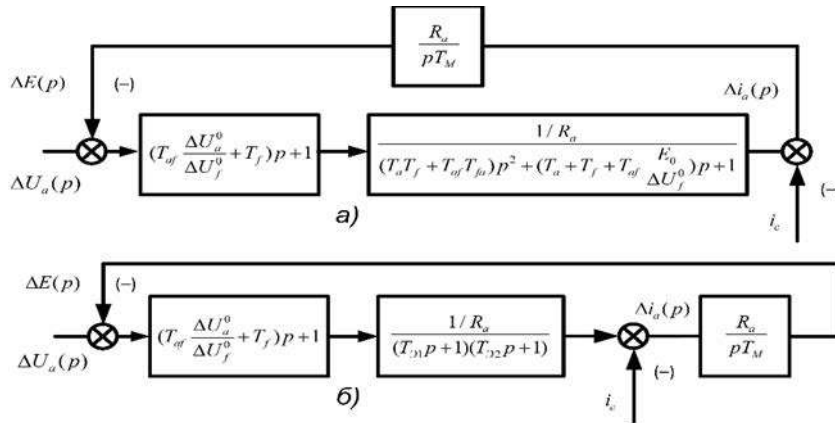


Рис. 2. Частичные структурные схемы вентильного двигателя для случаев:

а) $(T_a + T_f + T_{af} E_0 / \Delta U_f^0)^2 < 4(T_a T_f - T_{af} T_{fa})$; б) $(T_a + T_f + T_{af} E_0 / \Delta U_f^0)^2 \geq 4(T_a T_f - T_{af} T_{fa})$.

где Квп – коэффициент передачи преобразователя;
 - динамический коэффициент передачи двигателя по напряжению на якоре $\kappa_D = 1/M_{af}^0 \cos \beta_0 I_f^0$, 1/В·С;
 - электромагнитная постоянная времени эквивалентного якорного контура

$$T_a = (L_d + L_q) \cos^2 \frac{\pi}{m} + L_a^0 \cos 2\beta_0 / R_a;$$

- электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения $T_f = L_f / R_f$;

- электромеханическая постоянная времени

$$T_M = J R_a / (M_{af}^0 \cos \beta_0 I_f^0)^2;$$

- электромагнитные постоянные времени, учитывающие электромагнитную связь эквивалентного якорного контура и контура возбуждения при $\beta_0 \neq 0$

$$T_{af} = \frac{M_{af}^0 \sin \beta_0}{R_a}, \quad T_{fa} = \frac{M_{af}^0 \cos \beta_0}{R_f}.$$

В этих выражениях:

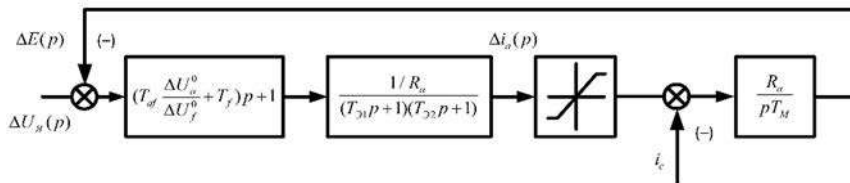


Рис. 3. Частичная структурная схема вентильного двигателя для случая $i_a \leq I_{a\max}$

Эквивалентная постоянная времени T_μ преобразователя, так же, как и в коллекторном электроприводе, обычно весьма мала, вследствие чего преобразователь не охватывается контуром регулирования. В результате для последовательной коррекции электропривода с ВД необходимо вводить два контура регулирования – по току якоря на входе УВК и по частоте вращения.

4. Система регулирования с управлением в цепи тока на входе УВК ВД

Внутренний контур является контуром регулирования тока на входе УВК. Структурная схема этого контура приведена на рис. 4. При отсутствии фильтров в цепи регулирования наименьшая величина постоянной интегрирования контура тока $T_\tau = T_n$.

β_0 - угол опережения включения вентилей УВК; m – число фаз ВД; J – момент инерции электропривода;

$$L_a^0 = (L_d - L_q) \frac{2m}{\pi} \cos^2 \frac{\pi}{2m} \sin \frac{\pi}{2m}; \quad M_{af}^0 = 2M_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m};$$

$R_a = 2R_\phi$ - параметры эквивалентного контура якоря ВД при 360/м – градусном законе коммутации УВК; L_d, L_q, M_m - индуктивные параметры синхронной машины ВД; R_ϕ - активное сопротивление фазы обмотки статора

Как объект регулирования ВД представляется последовательным соединением трех динамических звеньев направленного действия – форсирующего (рис. 2а), колебательного или двойного апериодического (рис 2.б) и интегрирующего.

На рис. 2а, б и 3 представлены структурные схемы ВД для различного соотношения постоянных времени, а также с учетом и без учета токоограничения на входе УВК.

В предположении, что контур тока настроен на технический оптимум эквивалентная величина некомпенсированной малой постоянной времени $T_\mu = T_\tau / a = T_{вп} / 2$.

Если пренебречь внутренней обратной связью по противо-э.д.с., разомкнутый контур регулирования тока соответствует рис. 5.

Передаточная функция регулятора определяется согласно [8] соотношением типа

$$W_{рег}(p) = \frac{1}{W_{ок}(p) p a \sigma},$$

где $\sigma = T_\mu, a = a_T$.

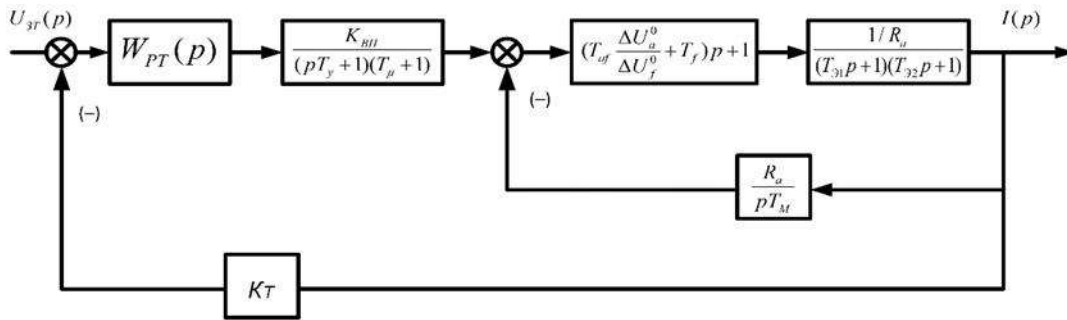


Рис.4. Структурная схема замкнутого контура регулирования тока якоря

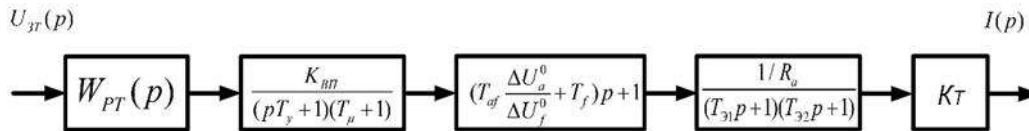


Рис.5. Структурная схема разомкнутого контура регулирования тока якоря

Из анализа структурной схемы следует, что

$$W_{ок}(p) = \frac{K_{ВП}K_T}{R_a} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1] \frac{1}{(pT_{\Delta 1} + T)(pT_{\Delta 2} + 1)}$$

Если корни характеристического полинома в (1) вещественные, т.е. выполняется условие

$$(T_a + T_f + T_{af} \frac{E_0}{\Delta U_f^0})^2 \geq 4(T_a T_f + T_{af} T_{fa})$$

и система управления предполагается безинерционной, то передаточная функция регулятора с учетом некомпенсированной инерционности объекта (T_μ) будет иметь вид:

$$W_{рег.т}(p) = \frac{(pT_{\Delta 1} + 1)(pT_{\Delta 2} + 1)}{p\alpha_f T_\mu \frac{K_{ВП}K_T}{R_a} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]}$$

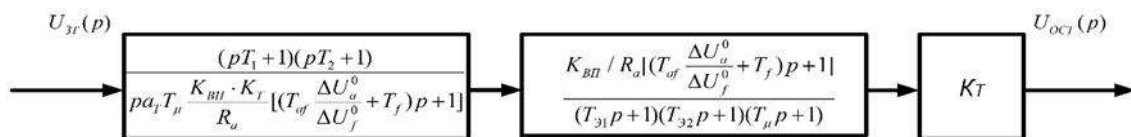


Рис. 6. Структурная схема разомкнутого оптимизированного контура регулирования тока

$$W_{рег.т}(p) = \frac{T_f [(T_a - \frac{T_{af}}{T_f} T_{fa})p + 1]}{T_\mu K_{ВП} K_T \frac{1}{R_a} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]} + \frac{1}{p T_\mu K_{ВП} K_T \frac{1}{R_a} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]} + \frac{T_a + T_{af} \frac{E_0}{\Delta U_f^0}}{p T_\mu K_{ВП} K_T \frac{1}{R_a} [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]} \quad (2)$$

Итак, регулятор тока по этому варианту представляет собой, согласно приведенному выражению передаточной функции (2), достаточно сложное звено, поскольку состоит из четырех усилителей – усилителя пропорционально - дифференцирующего действия, двух усилителей интегрирующего действия и суммирующего усилителя (рис.7).

Структурная схема оптимизированной разомкнутой цепи регулирования тока якоря приведена на рис. 6. В том случае, если корни характеристического полинома будут комплексными

$$W_{рег.т}(p) = \frac{R_a [(T_a T_f - T_{af} T_{fa})p^2 + (T_a + T_f + T_{af} \frac{E_0}{\Delta U_f^0})p + 1]}{p T_\mu K_{ВП} K_T [(T_{af} \frac{\Delta U_a^0}{\Delta U_f^0} + T_f)p + 1]}$$

Приведем передаточную функцию регулятора тока к виду (2):

Что касается регулятора тока по другому варианту, то согласно передаточной функции (1) регулятор тока может быть реализован последовательно соединенными усилителями пропорционально-интегрирующего и пропорционально-дифференцирующего действия, приведенными на рис.8). Передаточная функция замкнутого контура, включающего в себя объект и регулятор тока, может быть представлена в виде:

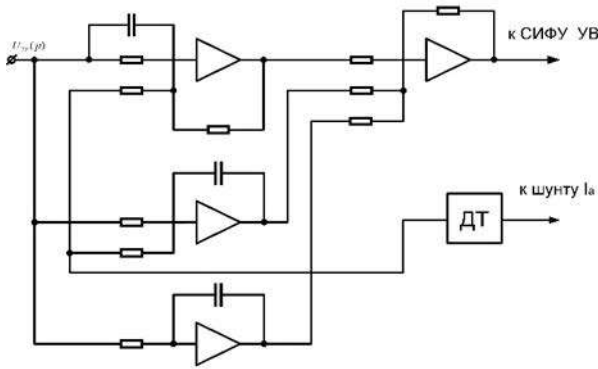


Рис. 7. Схема регулятора тока (первый вариант)

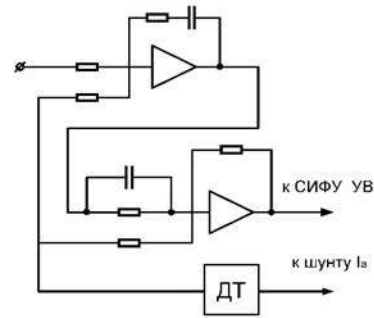


Рис. 8. Схема регулятора тока (второй вариант)

$$W_{T3}(p) = \frac{I(p)}{U_{T3}(p)} = \frac{1}{pT_T(pT_\mu + 1) + 1}$$

или в безразмерных единицах

$$W'_{T3}(p) = \frac{I(p)}{I_3(p)} = \frac{1}{pT_T(pT_\mu + 1) + 1}$$

5. Система регулирования частоты вращения

Рассмотрим структурную схему регулирования частоты вращения с оптимизированным контуром тока. Если не учитывать обратной связи по противо-э.д.с. ВД структурная схема имеет вид, приведенный на рис. 9.

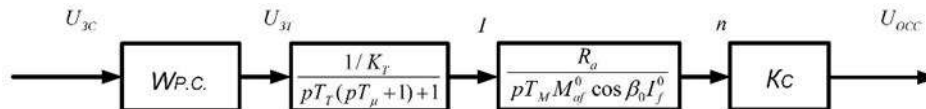


Рис. 9. Структурная схема регулирования частоты вращения ВД разомкнутой однократно-интегрирующей

Отбрасывая компоненты высшего порядка малости, получим на основании (1) передаточную функцию регулятора частоты вращения в виде

$$W_{PC}(p) = \frac{T_\mu}{a_c T_T} \cdot \frac{K_T M_{af}^0 \cos \beta_0 I_f^0}{K_C R_a}, \quad (3)$$

поскольку

$$W_{0k}(p) = \frac{R_a K_C}{p T_M K_T M_{af}^0 \cos \beta_0 I_f^0}; \quad \sigma = T_T, \quad a = a_c.$$

В соответствии с (3), структурная схема разомкнутого оптимизированного контура регулирования частоты вращения имеет вид (рис.10). Регулятор частоты вращения, как и в электроприводе постоянного тока с коллекторным двигателем является пропорциональным, то есть должен иметь ограничение выхода.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования частоты вращения

$$W_{C3}(p) = \frac{n(p)}{U_{3c}(p)} = \frac{1/K_C}{p a_c T_T + 1},$$

или в безразмерных единицах

$$W'_{C3}(p) = \frac{n(p)}{n_3(p)} = \frac{1}{p a_c T_T + 1}, \quad n_3 = \frac{U_{3c}}{K_C}.$$

Рассмотренная система регулирования содержит пропорциональный регулятор частоты

вращения и интегральную часть в регуляторе тока. Таким образом, система обладает статизмом по нагрузке, хотя и является астатической по заданию.

Астатической по нагрузке будет 2-х кратно интегрирующая система, которая представляет собой однократно интегрирующую систему, охватываемую по частоте вращения через интегрирующее звено. Объектом регулирования является, таким образом, однократно интегрирующая система регулирования. После структурных преобразований получаем структурную схему с одной обратной связью по частоте вращения, пропорционально-интегрирующим звеном и фильтрами на входе (компоненты высшего порядка малости не рассматриваются) согласно рис. 11. Передаточная функция замкнутой САУ в соответствии с рис.11 будет

$$W_{C3} = \frac{n(p)}{n_3(p)} = \frac{1}{p b_{ca} a_c T_T [p a_c T_T (p T_T + 1) + 1]},$$

а передаточная функция регулятора частоты вращения

$$W_{PC}(p) = \frac{(p b_{ca} a_c T_T + 1) T_M}{p b_{ca} a_c^2 T_T^2} \times \frac{K_T M_{af} \cos \beta_0 I_f^0}{K_C R_a}. \quad (5)$$

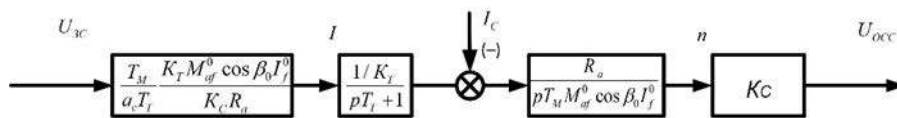


Рис. 10. Структурная схема регулирования частоты вращения ВД разомкнутой двукратно-интегрирующей.

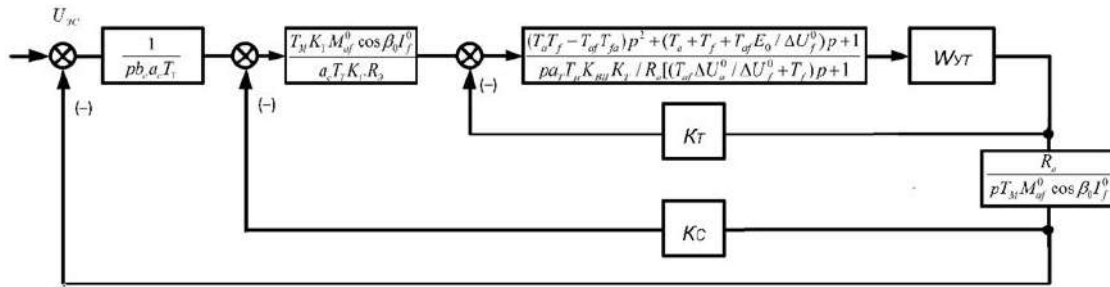


Рис. 11. Структурная схема регулирования частоты вращения ВД замкнутой двукратно-интегрирующей.

Заключение

Представление, на основе анализа ВД как объекта регулирования, одномерной структурной схемой дало возможность предложить перспективную скалярную систему управления электроприводом ГЭУ.

На этом основании сформирована передаточная функция регулятора тока внутреннего контура с учетом некомпенсированной инерционности объекта.

Система регулирования частоты вращения содержит пропорциональный регулятор частоты вращения и интегральную часть в регуляторе тока.

После преобразований получена структурная схема замкнутой двукратно-интегрирующей системы регулирования частоты вращения ВД.

Настройка параметров регуляторов такой замкнутой САУ осуществляется с учетом угла опережения включения вентилей УВК (рис.12).. Ее следует определять, исходя из того обстоятельства, что она может быть проведена в точке соответствующей наилучшему соотношению показателей динамики в разомкнутой системе.

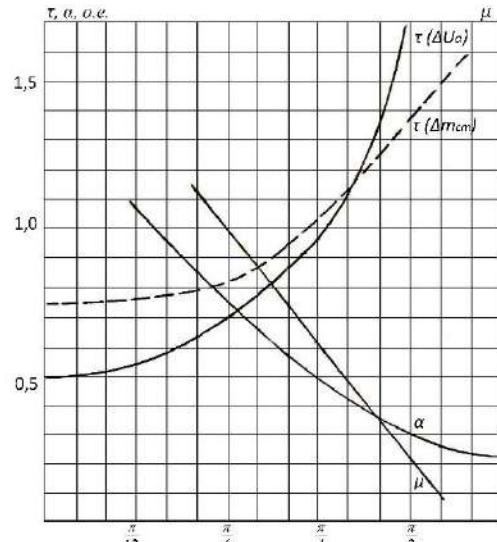


Рис. 12. Зависимость динамических показателей (времени переходного процесса τ , перерегулирования α и колебательности μ) от угла опережения включения вентилей УВК β_0

Литература

1. Вершинин В.И. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220. В.И. Вершинин, С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк. Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 95–102.
2. Могильников В.С. Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором: монография. В.С. Могильников, А. М. Олейников; под общ. ред. Олейникова А.М. 2-е изд. перераб. и доп. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. 350 с.
3. Jovanovic M.G. Sensorless vector controller for a synchronous reluctance motor. M.G. Jovanovic, Rt. E. Betz, D. Platt // IEEE Transactions on Industry Applications. 1998. 34(2). С. 346–54.
4. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, Е.Д. Кузнецов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 260 с.
5. Вершинин В.И. Алгоритм векторного управления гребными электроприводами на основе синхронных двигателей для ледоколов с двигателями типа «Азипод». В.И. Вершинин., С.В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): С.103–112.
6. Технические преимущества приводов на основе вентильных двигателей [Электрон. ресурс] / Сайт ОАО «Научно-производственное объединение «Русский электропривод».
7. Богданов В.И. Современные и перспективные алгоритмы управления гребными синхронными электродвигателями. В.И. Богданов, А.И. Ивановский, П.В. Адамович. Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 103 -112.
8. Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. В.В. Рудаков, Р.П. Мартикайнен. М.: Энергия, 1972. 120 с.
9. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока В.Г. Фишбейн. М.: Энергия, 1972. 136 с.
10. Аракелян А.К. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод: в 2-х кн. Кн. 2. Регулируемый электропривод с вентильным двигателем. А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев. М.: Энергоатомиздат, 1997. 498 с.

11. Высоцкий В.Е. Математическое моделирование вентильных двигателей с искусственной коммутацией. В.Е. Высоцкий. Самара: Изд-во СамГТУ, 2004. 351 с.

References

1. Vershinin V.I. Algorithm for controlling the rowing electric drive of the universal atomic icebreaker project 22220 [Algoritm upravleniya grebnym elektroprivodom universal'nogo atomnogo ledokola proyekta 22220]. V.I. Vershinin, S.V. Makhonin, V.A. Parshikov, V.A. Khomyak. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2017. Vol. 4(382). S. 95–102.
2. Mogil'nikov V.S. Theory, technology and operating modes of asynchronous motors with a two-layer rotor: monograph [Teoriya, tekhnologiya i rezhimy raboty asinkhronnykh dvigateley s dvukhsloynym rotorom: monografiya]. V.S. Mogil'nikov, A. M. Oleynikov, pod obschch. red. Oleynikova A.M. 2-e izd. pererab. i dop. Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2008. 350 s.
3. Jovanovic M.G. Sensorless vector controller for a synchronous reluctance motor. M.G. Jovanovic, Rt. E. Betz, D. Platt. IEEE Transactions on Industry Applications. 1998. 34(2). S. 346–54.
4. Slezhanovskiy O.V. Systems of subordinate regulation of AC electric drives with valve converters [Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatelyami]. O.V. Slezhanovskiy, L.Kh. Datskovskiy, E.D. Kuznetsov. M.: Energoatomizdat, 1983. 260 s.
5. Vershinin V.I. Algorithm of vector control of rowing electric drives based on synchronous motors for icebreakers with "Azipod" type engines [Algoritm vektornogo upravleniya grebnymi sinkhronnymi elektroprivodami na osnove sinkhronnykh dvigateley dlya ledokolov s dvizhiteleyami tipa «Azipod»]. V.I. Vershinin., S.V. Makhonin, V.A. Parshikov, V.A. Khomyak. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2019. 3(389): S. 103–112.
6. Technical advantages of actuators based on valve motors. Website of JSC "Scientific and Production Association "Russian electric drive" [Tekhnicheskiye preimushchestva privodov na osnove ventil'nykh dvigateley]. Sayt OAO «Nauchno proizvodstvennoye ob"yedineniye «Russkiy elektroprivod».
7. Bogdanov V.I. Modern and advanced control algorithms rowing synchronous motors [Sovremennyye i perspektivnyye algoritmy upravleniya grebnymi sinkhronnymi elektrodvigateleyami]. V.I. Bogdanov, A.I. Ivanovskiy, P.V. Adamovich. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2017. Vol. 4(382). S. 103 -112.
8. Rudakov V.V., Martikaynen R.P. Synthesis of electric drives with sequential correction [Sintez elektroprivodov s posledovatel'noy korraktsiyey]. V.V. Rudakov, R.P. Martikaynen. M.: Energiya, 1972. 120 s.
9. Fishbeyn V.G. Calculation of systems of subordinate regulation of the direct current valve electric drive [Raschet sistem podchinennogo regulirovaniya ventil'nogo elektroprivoda postoyannogo toka]. V.G. Fishbeyn. M.: Energiya, 1972. 136 s.
10. Arakelyan A.K. Valve electric machines and adjustable electric drive: in 2 books. Book 2. Adjustable electric drive with a valve motor [Ventil'nyye elektricheskiye mashiny i reguliruyemyy elektroprivod: v 2-kh kn. Kn. 2. Reguliruyemyy elektroprivod s ventil'nym dvigatelem]. A.K. Arakelyan, A.A. Afanas'yev. M.: Energoatomizdat, 1997. 498 s.
11. Vysotskiy V.E. Mathematical modeling of valve engines with artificial switching [Matematicheskoye modelirovaniye ventil'nykh dvigateley s iskusstvennoy kommutatsiyey]. V.E. Vysotskiy. Samara. publishing house of Samara state technical University, 2004. 351 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виталий Евгеньевич Высоцкий, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru

Vitaly E. Vysotsky, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department «Ship's electric equipment», Sevastopol state University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation. e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru

Светлана Андреевна Конева, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ksa@mail.ru

Svetlana A. Koneva, Ph.D. (Eng), assistant professor, head of the department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ksa@mail.ru

Игорь Юрьевич Марков, аспирант кафедры «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: markov.igor.ex@ya.ru

Igor U. Markov, graduate student of the Department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Fed., e-mail: markov.igor.ex@ya.ru

Владимир Муратович Цалоев, доцент кафедры «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: 1._@mail.ru

Vladimir M. Tsaloev, associate professor of the Department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: 1._@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.05.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 681.5.07:007.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.034>

Графические критерии собственной устойчивости судна на мелководье

А.В. Чернышов¹, e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com¹Нижегородский Государственный Технический Университет им. П.Е. Алексеева

Аннотация. Форма корпуса речного водоизмещающего судна во многом определяет его динамические свойства. Удачно подобранные геометрические параметры обеспечивают судну не только требуемую грузоподъемность и грузоместимость, но и предсказуемую управляемость при различных внешних условиях. Задача проектирования корпусов судов с заданными характеристиками управляемости связана с исследованием связи между геометрией корпуса и его динамикой. Динамику судна оценивают по виду характеристики управляемости и по критериям переходных процессов при выполнении специальных маневров головными судами серии или масштабными моделями [1, 2]. Использование таких методов затруднительно на этапе проектирования, так как необходимо изготовить масштабную модель и провести ее испытания при различных внешних условиях. Кроме того, этот способ достаточно затратный по времени, особенно если требуется изготавливать большое количество моделей. С целью сокращения числа моделей предлагается на этапе проектирования качественно оценивать динамические свойства будущего корпуса, а на этапе натурных экспериментов производить только небольшие корректировки.

Ключевые слова: графические критерии собственной устойчивости, собственная управляемость судна, форма корпуса судна, зависимость управляемости судна от глубины, бифуркационное значение глубины, устойчивость состояний равновесия.

Graphical criteria of inherent stability of river vessels for the case of shallow waters navigation

Andrey V. Chernyshov¹ e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The hull geometry of a displacement riverboat largely determines its dynamic properties. Successfully selected geometric parameters provide a vessel not only with required cargo capacity and carrying capacity, but also with predictable steerability under various external conditions. The task of ship hull design with preset steerability properties is connected with investigation of relation between geometry of the hull and its dynamics. Vessel dynamics is estimated by type of controllability characteristic and by criteria of transients during special maneuvers by head vessels of series or scale models [1, 2]. The use of such methods is difficult at the design stage, since it is necessary to make a scale model and test it under various external conditions. In addition, this method is quite time-consuming, especially if a large number of models is required. In order to reduce the number of models, it is proposed to assess qualitatively the dynamic properties of the future hull at the design stage, and to make only small adjustments at the stage of full-scale experiments.

Key words: graphical criteria of inherent stability, vessels inherent controllability, hulls geometry, functional dependence of controllability from depth, bifurcation value of depth, stability of equilibrium state.

Введение

Речные водоизмещающие суда, с точки зрения теории управления, представляют собой нелинейную динамическую систему корпус – надстройка – движительно-рулевой комплекс – внешняя среда, параметры которой определяются как состоянием внешней среды (глубиной и шириной фарватера, направлением и силой ветра, течениями), так и формой рулей, надстроек и корпуса. Форма корпуса и состояние внешней среды определяют значения присоединенных масс воды, величины коэффициентов гидродинамических сил и моментов, которые влияют на динамику объекта в процессе движения. При некоторых значениях глубин влияние может быть настолько сильным, что управляемость объекта может существенно измениться. Это может привести к аварийной ситуации при медленной реакции штурмана [3]. Поэтому, необходимо, перед проектированием, проводить оценочный расчет управляемости судна для будущих условий плавания, выявлять возможные состояния внешней среды, при которых происходит качественное изменение управляемости. Оценку целесообразнее начинать с исследования подсистемы корпус – внешняя среда, как ключевой

общей системе корпус – надстройка – движительно-рулевой комплекс – внешняя среда. Правильно выбранная форма корпуса обеспечивает прогнозируемую управляемость будущего судна при различных внешних условиях, что существенно снижает риск возникновения аварии.

Глубина фарватера – один из основных факторов, который влияет на динамические особенности подсистемы корпус – внешняя среда. При изменении глубины ее динамика может качественно измениться, стать неустойчивой. Определение таких глубин, также как и исследование собственной устойчивости, является целью математического моделирования, предшествующего проектированию корпуса. Учитывая, что процесс математического моделирования требует специальных навыков и программ, для практического применения необходимо разработать наглядные критерии, позволяющие оценить собственную динамику корпуса без решения дифференциальных уравнений.

Критерии собственной устойчивости

Устойчивость состояний равновесия определяется корнями характеристического уравнения математической модели. Динамику

речных водоизмещающих судов с достаточной степенью точности отражает математическая модель, предложенная Басиным А.М. [4], которая переработана в более компактный и удобный для моделирования на ЭВМ вид Р.Я Першицем [5]².

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

где $P(\beta_d) = H\beta_d|\beta_d|$, $A, B, C, D, H, S_\beta, S_\omega \in R$ - гидродинамические коэффициенты, β, ω - координаты состояния, U - управляющее воздействие (угол перекадки руля).

Для исследования собственной устойчивости рассмотрим модель (1) при непереложенном руле ($U = 0$):

$$\begin{cases} \frac{d\beta_d}{dt} = A\beta_d + B\omega + P(\beta_d) \\ \frac{d\omega}{dt} = C\beta_d + D\omega \end{cases}, \quad (2)$$

Характеристическое уравнение системы (2):

$$\lambda^2 - \sigma\lambda + \Delta = 0,$$

где $\sigma = A \pm 2H\beta_d + D$,

$$\Delta = \begin{vmatrix} A \pm 2H\beta_d & B \\ C & D \end{vmatrix}, \text{ знак «+» для } \beta_d > 0, \text{ а знак}$$

«-» для $\beta_d < 0$,

λ_1 и λ_2 - корни характеристического уравнения.

Если действительная часть корней характеристического уравнения меньше нуля, то состояние равновесия - устойчивое. Состояния равновесия, или особые точки системы (2), находятся на пересечении нулевых изоклин фазового портрета. Запишем уравнения нулевых изоклин:

$$\begin{cases} 0 = A\beta_d + B\omega + H\beta_d|\beta_d|, \text{ или,} \\ 0 = C\beta_d + D\omega \end{cases}$$

выразив ω :

$$\begin{cases} \omega = -\frac{A\beta_d + H\beta_d|\beta_d|}{B} \\ \omega = -\frac{C\beta_d}{D} \end{cases}. \quad (3)$$

Преобразуем (3) с учетом $\Delta_0 = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$:

$(\Delta_0 \mp HD\beta_d)\beta_d = 0$, где знак «-» соответствует $\beta_d > 0$, а «+» - $\beta_d < 0$.

У системы (2), в точке O с координатами $\beta_d = 0, \omega = 0$ всегда существует состояние

равновесия. При $\frac{\Delta_0}{HD} < 0$ появляются еще 2: в точках A_+ и A_- с координатами соответственно $\beta_d^+ = -\frac{\Delta_0}{HD}, \omega_0^+ = \frac{\Delta_0 C}{HD^2}$ и $\beta_d^- = \frac{\Delta_0}{HD}, \omega_0^- = -\frac{\Delta_0 C}{HD^2}$ (рис.1)³.

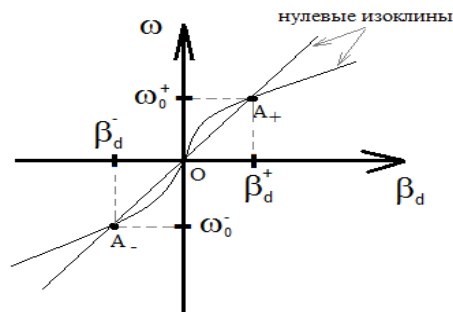


Рис. 1. Нулевые изоклины системы (2), соответствующие 3-м состояниям равновесия

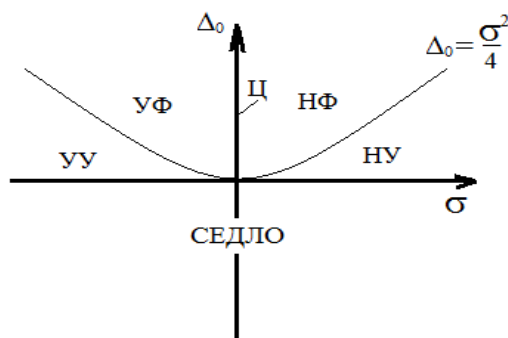


Рис.2а. Области состояний равновесия (УУ – устойчивый узел, УФ – устойчивый фокус, Ц – центр, НФ – неустойчивый фокус, НУ – неустойчивый узел)

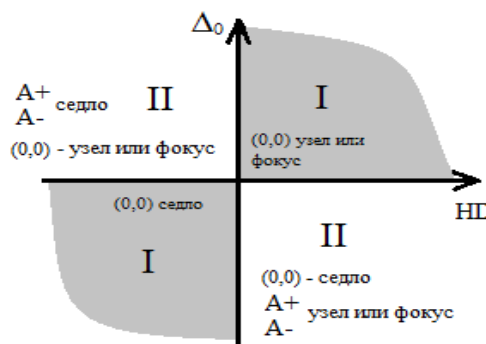


Рис.2б. Области с разным числом состояний равновесия

Если система (2) имеет только одно состояние равновесия ($\frac{\Delta_0}{HD} > 0$), то оно будет, либо узлом

при непереложенном руле $R_{\text{право}} = \frac{v}{\omega_0^+}$ или

$$R_{\text{лево}} = \frac{v}{\omega_0^-} \quad [7].$$

² Подробная классификация и обзор моделей приведены в [6]

³ Зная числовые значения ω_0^+ и ω_0^- , а также линейную скорость v , можно вычислить радиус циркуляции судна

(фокусом) при $\Delta_0 > 0$ и $\sigma \neq 0$, либо седлом при $\Delta_0 < 0$. Устойчивость узла (фокуса) будет определяться знаком σ . Рассмотрим плоскость с прямоугольными декартовыми координатами σ и Δ_0 и отметим на ней области, соответствующие тому или иному состоянию равновесия (рис.2а) [8]. При изменении параметра системы (2) (в данном случае – глубины) коэффициенты модели также будут меняться, что вызовет изменение σ и Δ_0 . Отметив точки, соответствующие определенным глубинам, на плоскости σ, Δ_0 получим кривую l , переходящую из одной области в другую. По тому, в какой области состояний равновесия находится изображающая точка кривой, будем судить об изменении собственной устойчивости при изменении глубины. Практически важно, чтобы, для реальных судов, кривая l располагалась в области устойчивых узлов или фокусов при всем диапазоне глубин. Таким образом, первым критерием оценки собственной устойчивости корпуса будет являться расположение кривой l на плоскости σ, Δ_0 .

Если $\frac{\Delta_0}{HD} < 0$, то система (2) имеет 3 состояния равновесия⁴. В этом случае возможны 2 ситуации:

1. При $\Delta > 0$ - 2 устойчивых состояния равновесия (узел или фокус) в точках A_+ и A_- , и неустойчивое (седло) в точке $\beta_d = 0, \omega = 0$.
2. При $\Delta < 0$ - 2 неустойчивых состояния равновесия (седло) в точках A_+ и A_- , и узел или фокус в точке $\beta_d = 0, \omega = 0$. Устойчивость узла или фокуса определяется знаком σ_0 , где $\sigma_0 = A + D$: при $\sigma_0 < 0$ фокус (узел) устойчивый.

При изменении глубины значения Δ_0 и HD будут меняться. Рассмотрим плоскость с прямоугольными декартовыми координатами HD и Δ_0 (рис. 2б). Отметим на этой плоскости области, соответствующие различному числу состояний равновесия и укажем их тип. Рассчитаем значения Δ_0 и HD , для разных значений глубин. Соединив отмеченные точки, получим кривую L , по расположению которой будем судить об изменении числа и типа состояний равновесия подсистемы корпус-внешняя среда в процессе движения. Число состояний равновесия изменяется при пересечении кривой L осей Δ_0 и HD . Если прямая L пересекает ось HD , то говорят, то в точке пересечения система имеет негрубое состояние равновесия [9]. Такое состояние равновесия возникает при качественном изменении динамических свойств системы. Значение

глубины в точке пересечения оси HD будем называть бифуркационным. Движение при глубинах, близких к бифуркационным, требует особого внимания от штурмана. Зная будущие условия плавания, следует так проектировать корпуса, чтобы бифуркационное значение глубины не совпадало с глубинами на опасных участках (проходы под мостами, подходы к шлюзам, каналы и проч.). Таким образом, вторым критерием оценки собственной устойчивости корпуса будет являться расположение кривой L на плоскости Δ_0, HD .

Практическое применение критериев собственной устойчивости

На практике, при проектировании нового судна, может быть использован объект-аналог. Корпус аналога масштабируется согласно требованиям технического задания. Динамика нового объекта может отличаться от динамики объекта аналога, поэтому новый корпус необходимо исследовать, используя введенные выше критерии. Учитывая, что расчет достаточно просто реализуем, можно исследовать несколько корпусов различной формы и выбрать наиболее подходящий под известные заранее условия плавания. Используя 2 введенных ранее критерия, проведем анализ собственной устойчивости 2 судов с корпусами разной формы и габаритными размерами $L=100$ (м), $V=16.6$ (м), $T=3.5$ (м):

- 1) корпус 1: $\alpha = 0.667, \beta = 0.952, \delta = 0.635, V=3600$ (т).
- 2) корпус 2: $\alpha = 0.844, \beta = 0.968, \delta = 0.817, V=4700$ (т).

При значениях глубины h_ϕ , соответствующих мелководным фарватерам рек и каналов, рассчитаем коэффициенты системы (2) по известным методикам [1, 10]. Затем, вычислим значения $\Delta_0, \sigma_0, HD, \Delta, \sigma$, где $\sigma_0 = A + D$ (Таблица 1) и построим кривые l_i и L_i для каждого судна (рис. 3), где i - номер корпуса судна.

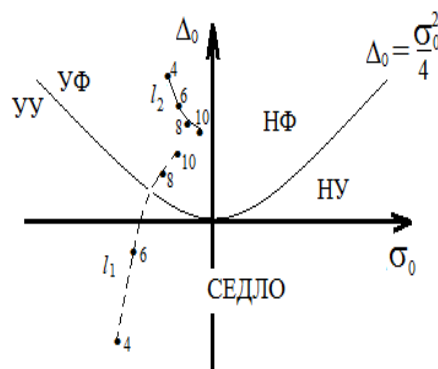


Рис.3а. Изменение устойчивости состояния равновесия $\beta_d = 0, \omega = 0$ при изменении глубины

⁴ Будем рассматривать такие корпуса, у которых $\sigma < 0$.

References

1. Gofman A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya [Theory and Calculation of Inland Navigation Vessel Turnability]. L.: Sudostroenie, 1971 – 256 s.
2. Rukovodstvo po opredeleniyu manevrennykh kharakteristik sudov [Guidelines for determining the maneuvering characteristics of ships]. ND №2-030101-007 // Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva.- 2005. 16 s.
3. Solov'ev A.V., Chernyshov A.V., Chirkova M.M. Informatsionnoe obespechenie sistemy upravleniya sudnom [Data support of ship's control system]//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. №1-1(51). S .71-75.
4. Basin A.M. Khodkost' i upravlyaemost' sudov [Navigability and controllability of ships]. – M: Transport, 1977. – 456 s.
5. Pershits R.Ya Upravlyaemost' i upravlenie sudnom [Controllability and control of the ship]. – L.: Sudostroenie, 1987 - 274 s.
6. Yu.I. Yudin, I.I. Sotnikov. Matematicheskie modeli ploskoparallel'nogo dvizheniya sudna. Klassifikatsiya i kriticheskiy analiz [Mathematical models of plane-parallel motion of a ship. Classification and critical analysis]. MGTU, Murmansk - 2006. 95 s.
7. Voytkunskiy Ya.I. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchikh sudov: Spravochnik po teorii korablya [Steering of Displacement Ships: Handbook of Ship Theory]/ Ya.I. Voytkunskiy - L.: Sudostroenie, 1985. T. 3. S. 544.
8. Andronov A.A., Vitt A.A., Khaykin S.E. Teoriya kolebaniy [Oscillation Theory]. – M.: Fizmatgiz – 1959. 916 s.
9. Bautin N.N., Leontovich E.A. Metody i priemy kachestvennogo issledovaniya dinamicheskikh sistem na ploskosti [Methods and techniques for qualitative study of dynamical systems on the plane]. – M.: Nauka – 1976. 495 s.
10. Pavlenko V.G. Khodkost' i upravlyaemost' sudov [Navigability and controllability of ships]. - M: Transport, 1991. – 397s.
11. Chernyshov A.V, Chirkova M.M.. Statiko-dinamicheskie osobennosti vodoizmeshchayushchikh sudov [Static-dynamic properties of displacement vessels] // Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i sistemy` upravleniya. 2003 (№.4). S 153-158

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Поступила в редакцию: 14.07 2021

Принята к публикации: 15.09.2021

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.61.052

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.025>

Особенности управления судами без экипажей

Б.И. Олейников¹, e-mail: mokondo@mail.ru, **И.И. Костылев**¹, e-mail: kostylevii@gumrf.ru,
Д.В. Коняев¹, koniaevdv@gumrf.ru, **А.П. Петров**¹, petrovap@gumrf.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация Материал статьи отражает развитие тенденции внедрения в практику судоходной индустрии судов без экипажа на борту. Оснащение современных судов интегрированными системами контроля и управления оборудованием позволяет управлять судовой энергетической установкой без постоянного присутствия членов машинной команды. Многие вопросы, связанные с проведением мероприятий по обслуживанию механизмов и устройств решаются в период межрейсовых стоянок специальным персоналом. Это приближает деятельность экипажа к условиям работы операторов технологических объектов и стимулирует появление транспортных средств с малозакипажным составом или вообще без экипажа. Морские автономные надводные суда (МАНС), как они классифицируются в международной практике, уже реальность и необходимо обоснованно подходить к системе управления по мере увеличения количества таких объектов и их технического совершенствования. Основное внимание в статье уделяется роли и месте расположения судовых специалистов, без которых практически невозможно технически грамотно эксплуатировать судовую энергетическую установку, независимо от ее типа и особенностей конструктивного исполнения. Приводятся примеры уже работающих МАНС. Авторы рассматривают наиболее реальные варианты формирования системы искусственного интеллекта и наделяют ее функциями контроля состояния и управления элементами судовой энергетики.

Ключевые слова: морское автономное надводное судно, МАНС, безэкипажное судно, оптимизация расходов, безопасность эксплуатации, системы управления, международные и национальные требования, уровень автоматизации, кадры, искусственный интеллект.

The peculiarities of the unmanned ships operating

Boris I. Oleynikov¹, e-mail: mokondo@mail.ru, **Ivan I. Kostylev**¹, e-mail: kostylevii@gumrf.ru,
Dmitriy V. Koniaev¹, koniaevdv@gumrf.ru, **Alexander P. Petrov**¹, petrovap@gumrf.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. The article material reflects the trend development implementing into the shipping industry practice the vessels without a crew on board. Equipping modern ships with integrated monitoring and control systems allows the ship's power plant to be operated without the constant presence of the engine crew members. Many issues related to the maintenance of mechanisms and devices are resolved during inter-trip stops by special personnel. This brings the crew activities closer to the working conditions of the technological facilities operators and stimulates the appearance of means of transport with a small crew or no crew at all. Maritime Autonomous Surface Ship (MASS), as they are classified in international practice, are already a reality and it is necessary to reasonably approach the control system as the number of such objects increases and their technical improvement. The main attention in the article is paid to the role and location of ship specialists, without whom it is practically impossible to operate a ship power plant in technically competent manner, regardless of its type and design features. Examples of already operating MASS are given. The authors consider the most realistic options for an artificial intelligence system formation and endowing it with the functions of monitoring the state and control of the elements of ship power engineering.

Keywords: Maritime Autonomous Surface Ship, MASS, unmanned ships, cost optimization, operational safety, management systems, international and national requirements, level of automation, human resources, artificial intelligence systems.

Введение

Современные морские суда различного назначения оснащаются высокоавтоматизированными энергетическими установками с использованием электроэнергетических систем высокого напряжения. Это позволяет повысить надежность установок, их экономичность и использовать эффективные движительно-рулевые установки, включая АЗИПОД.

Практически все современные суда оснащаются интегрированными системами управления (ИСУ) оборудованием, механизмами, системами, что позволяет управлять элементами судовой энергетической установки (СЭУ) с мостика или из центрального поста и не требуется постоянного присутствия членов машинной команды в машинном отделении. Судам присваиваются знаки

автоматизации AUT1-ICS, AUT2-ICS или AUT3-ICS, указывающими на возможность безвахтенного обслуживания механических установок с применением ИСУ. [1]

Существенно изменяются условия работы экипажа по оптимальному использованию оборудования.

Например, обеспечение топливоподачи и процессов газообмена двухтактных дизелей осуществляется контроллерами без его остановки. В зависимости от условий плавания и других ограничений, заложенных в программу, система управления, изменяя угол опережения и продолжительность подачи топлива, управляет выпускными клапанами, автоматически выбирает режим работы дизеля, соответствующий минимальному расходу топлива, оптимальной скорости движения судна или режим с минимальным

содержанием в выхлопных газах составляющих, контролируемых в соответствии с Конвенцией МАРПОЛ и т.п.

Многие вопросы, связанные с планированием и проведением мероприятий по обслуживанию технических средств СЭУ (поддержание их исправного технического состояния), решаются с участием специальных ремонтных бригад в период межрейсовых стоянок на основе данных, получаемых от судовых систем контроля и мониторинга оборудования и накапливаемых в береговых центрах.

Условия работы специалистов, обслуживающих современные СЭУ, уже в значительной степени соответствует условиям работы операторов крупных энергетических, технологических объектов.

1. Преимущества, экономическая эффективность безэкипажных судов (МАНС)

Уровень развития технологий и автоматизации на морских судах позволяет всерьез обсуждать вопросы создания малоэкипажного или безэкипажного судна и осуществления безэкипажного судоходства. Интерес к автономным и дистанционно контролируемым судам быстро растет. Благодаря последним разработкам в области сенсорных технологий, возможностей подключения в море, программному обеспечению и алгоритмам для анализа и принятия решений, первые коммерческие проекты готовы к запуску в ближайшем будущем.

Область автономных судов является широкой, с множеством различных приложений и концепций автоматизации, которые могут принести пользу морской отрасли. От полностью беспилотных кораблей до судов, дистанционно управляемых наземными виртуальными постами управления для поддержки систем, которые предупреждают экипаж перед столкновением или помогают оптимизировать операции.

Автономное судоходство может предложить способ перемещения грузов с берега на море, устранения заторов и снижения затрат на техническое обслуживание, а также повышения качества и безопасности воздуха. Эти преимущества побудили многие правительства задуматься о самостоятельных концепциях, а такие страны, как Финляндия, Япония, США, Россия, Сингапур, проводят исследования и испытания.

При этом предполагается, что безэкипажные суда (БЭС по международной классификации – морские автономные надводные суда – МАНС) коренным образом изменят морскую отрасль, обеспечивая большую эффективность, экономию затрат, а также благодаря повышению безопасности и охраны, которые не могут быть достигнуты на судах с экипажем.

Среди других преимуществ МАНС следует отметить сокращение сроков и стоимости его строительства (из-за отсутствия необходимости иметь каюты, системы, обеспечивающие жизнедеятельность экипажа и т.п.), увеличиваются объемы грузовых помещений. Стоимость эксплуатации также будет снижена из-за более обтекаемых форм корпуса и отсутствия экипажа.

Немаловажным является и такой факт, как ожидаемое снижение угроз пиратства из-за отсутствия экипажа. Судовые компании постоянно работают над оптимизацией эксплуатационных расходов, так как почти половина из них приходится на содержание экипажей судов [2]. Обслуживание безэкипажного судна не должно стать проблемой, поскольку, сама конструкция должна быть максимально простой во избежание неполадок. Судно будет устроено таким образом, что технические сбои на нем будут сведены к нулю.

Среди важнейших плюсов таких судов выделяют их безопасность, поскольку автономное судоходство практически исключает влияние человеческого фактора – главной причины чрезвычайных происшествий на море (около 80 %) [3].

Так, по данным одного из крупнейших финансово-страховых концернов Allianz Global Corporate & Specialty AG стоимость убытков в результате ошибок экипажа при морских перевозках в 2017 г. составила 1,6 млрд долларов [4].

2. Некоторые результаты реализации проекта МАНС

Однако для того, чтобы безэкипажные суда были безопасными, необходимо провести работы по созданию надежных систем управления, надежных и максимально точных навигационных, информационных систем [5] и Центров Дистанционного Управления (ЦДУ) с соответствующей инфраструктурой.

Считается, что для МАНС более актуальным вопросом является не отсутствие экипажа, а вероятность информационного сбоя, потеря сигнала, неполадки в работе систем навигации и автоматики, радиосвязи и обмена информации и т.п. Эти вопросы представляются первостепенными, и над поиском и созданием оптимальных решений работают сейчас специалисты в Европе, США и Азии

МАНС еще не находят широкого применения в коммерческой эксплуатации, но по всему миру реализуется несколько проектов, направленных на то, чтобы сделать автономные операции судов реальностью.

В 2018 году небольшое автоматическое судно «SB Met» (длина 2,4 м), построенное норвежской компанией Offshore Sensing AS, впервые пересекло Атлантический океан [3]. Плавание судна проходило под контролем оператора, находившегося на берегу [6].

Первый в мире автономный беспилотный контейнеровоз с нулевым выбросом (чего) «Yara Birkeland» передан заказчику – Yara International. Основные данные судна «Yara Birkeland»: длина – 80 м, ширина – 15 м, осадка максимальная – 6 м, максимальная скорость – 13 уз., вместимость – 120 TEU, дедвейт – 3200 т, главные движители – 2 Азипода, 2 носовых подруливающих устройства, емкость аккумуляторных батарей – 7–9 МВтч.

Особенности судна:

- без балластных танков (ballast free), комплект батарей как балласт;

- полностью на батареях;
- полностью цифровая система обработки груза;
- автоматическая электрифицированная система выгрузки/погрузки груза;
- автоматическая швартовка/отход от причала;
- полностью автономная и беспилотная (без экипажа) работа судна;
- работа судна на удалении от берега до 12 морских миль.

Судно будет работать между портами на расстоянии 7 – 30 миль. На первой фазе проекта (работа судна с экипажем) будет использоваться съемный мостик с оборудованием для управления судном. По окончании подготовительных работ, когда судно будет полностью готово для автономной работы, мостик будет удален.

Судно оснащено ключевыми технологиями Kongsberg, которые обеспечивают дистанционное и автономное управление, а также электроникой, аккумуляторной и силовой установками разработки Kongsberg [7].

Компания IBM и некоммерческая организация Promare (Великобритания) проводят испытательные плавания беспилотного судна «Maufloer». Планируется, что под управлением искусственного интеллекта судно будет полгода собирать данные о состоянии Атлантического океана, в том числе о содержании частиц пластика в воде, а также сведения о морских животных. Основная цель проекта – решение одной из главных проблем небольших безэкипажных судов – длительность автономной работы [8].

Ведущие игроки морской и IT-индустрии объединились в проекте «One Sea – Autonomous Maritime Ecosystem» (Единое море – автономная морская экосистема) для совместной разработки первой в мире системы автономных судов. Общее видение партнеров по проекту состоит в том, чтобы обеспечить в Балтийском море плавание судов с полностью дистанционным управлением, а после 2025 года обеспечить автономное коммерческое морское судоходство. Испытательный полигон для этого проекта создан у западного побережья Финляндии [9].

Свои первые шаги новая технология делает и в акваториях России. В рамках проекта с сентября 2020 года проводились береговые испытания и завершена установка экспериментального оборудования на борту трех судов: грунтоотвозной барже «Рабочая», сухогрузе «Пола Анфиса» и танкере «Михаил Ульянов». Также пульты дистанционного управления были установлены на земснаряде «Редут», в офисах «Пола Групп» и «Совкомфлот» (СКФ).

Ключевая цель этих испытаний – доработать экспериментальные системы до уровня готовых продуктов на основе реального опыта, мнения судоводителей и судовладельцев [10].

Экспериментальные работы по проблеме МАНС ведутся достаточно интенсивно, но вопрос широкого

применения этой технологии будет зависеть от решения судостроителей, судовладельцев и готовности инфраструктуры.

Кроме того, несмотря на декларируемые преимущества безэкипажных судов, а также на исследования, ведущиеся в этой области, в настоящий момент МАНС не соответствуют международной нормативной базе, охватывающей безопасность, охрану окружающей среды, ответственность и компенсации при страховании и т.д.

Фактически развитие техники и технологий, и внедрение автоматизации на морском флоте опережают международные и национальные нормы правового регулирования в морской отрасли.

Хотя современная нормативная база хорошо адаптировалась к новым технологиям в морской отрасли, тем не менее вопрос отсутствия экипажа на судне никак не учитывается.

Учитывая эти обстоятельства Международная морская организация (ИМО), начиная с 2018 года, ведет активную плановую работу по оценке международной нормативной базы (Regulatory Scoping Exercise – RSE) с целью возможности использования требований существующих Конвенций и Кодексов к морским автономным надводным судам - МАНС («Maritime Autonomous Surface Ship – MASS») и выявления сфер развития требований к таким судам, для обеспечения их безопасной эксплуатации на рынке морских перевозок [11].

К 2022 году ИМО планирует создать подробный план мероприятий по доработке Международных конвенций и Кодексов требованиями к безэкипажным судам.

ИМО также отмечает, что проблемой безэкипажных судов занимаются японские судоходные компании: проводятся в Тихом океане испытания судов с дистанционным управлением и к 2025 году ожидается появление полностью автономных судов [12].

Кроме того, отмечается, что Компания Rolls-Royce Commercial Marine (с 2019 г. подразделение Kongsberg Maritime) проводит испытания совместно с IBM по дистанционному управлению коммерческими судами, а их появление ожидается к 2035 год [13].

3. ИМО об уровнях автономности МАНС

МАНС включает в себя различные уровни автоматизации, начиная от частично автоматизированных систем, которые помогают экипажу, и заканчивая полностью автономными системами, которые не требуют вмешательства человека.

Комитет ИМО по безопасности на море для проведения анализа исследований, проблем, связанных с использованием МАНС, определил следующие уровни автономности [10]:

1. МАНС управляется экипажем, системы автоматизации используются для части функций и как системы поддержки принятия решений;
2. МАНС управляется дистанционно, но на борту присутствует экипаж;

3. МАНС управляется дистанционно, на борту нет экипажа;

4. МАНС полностью управляется автоматически.

Это именно уровни автономности, а не классы или технические типы судов, определенные ИМО для того, чтобы понимать, какие регуляторные нормы в том или ином случае могут потребовать изменений.

То есть, одно и то же судно может функционировать в разных уровнях автономности в течение одного и того же рейса.

Видимо, эти уровни автономности сохраняются и в дальнейшем при внедрении технологии в обычную практику по мере готовности судовладельцев.

Российский Морской Регистр Судоходства (РМРС) и Международная Ассоциация Классификационных Обществ (МАКО) направление «Умные суда/Интеллектуальные суда/МАНС» также относят к стратегическим решениям и принимают соответствующие меры.

РМРС опубликовал «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)». Рекомендации, представленные в документе, основаны на результатах научного исследования по МАНС и дополняют обязательные требования Регистра в соответствии с классом и назначением судна [14].

Новый документ учитывает широкий диапазон МАНС с различной степенью вовлеченности человека в управление судном, его системами и техническими средствами. Введены категории судов в зависимости от режимов движения в открытом море, а также в ограниченной акватории, например, в узкостях, в портах, в местах швартовки.

Среди ключевых разделов - системы обеспечения ситуационной осведомленности, средства радиосвязи и обмена данными, навигации и маневрирования, судовая энергетическая установка; центр дистанционного управления (стационарный или мобильный).

Важнейшими аспектами надежной эксплуатации дистанционно-управляемых и автономных судов является обеспечение безотказной работы судовых механизмов и систем и кибербезопасность.

На прошедшем в 2018 году во Владивостоке Международном дальневосточном морском салоне замминистра промышленности и торговли РФ Олег Рязанцев по поводу использования безэкипажных судов отметил, что сначала компании будут использовать суда с дистанционным управлением и сокращенной численностью экипажа, затем появятся полностью автономные суда. Безэкипажное управление судами существенно сократит издержки компаний в части кадрового обеспечения.

В том же 2018 году глава Объединённой Судостроительной Корпорации (ОСК) А. Рахманов высказывал мнение о том, что первые проекты безэкипажных судов могут появиться через полтора года, а затем они будут переноситься на индустриальные решения. А главная проблема, по его мнению, заключается в том, чтобы найти оператора такого судна, готового заменить свои традиционные суда на безэкипажные. И такая готовность будет иметь место, когда компании-судовладельцы будут располагать специалистами, готовыми эксплуатировать такие суда [15].

4. О кадрах для работы с МАНС

Но теперь встает вопрос - а какие кадры потребуются для малозкипажных судов и какие специалисты потребуются для управления безэкипажными судами? К сожалению, пока эти вопросы не находят должного обсуждения.

Вопросы о качестве подготовки специалистов всегда находились в центре внимания кафедр, Ученых советов отраслевых учебных заведений.

Для понимания того, какие специалисты потребуются в переходный период и в процессе безэкипажного мореплавания, кратко рассмотрим условия работы и основные требования к персоналу ЦДУ и МАНС в соответствии с документом РМРС «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)». Этот аспект, прежде всего, рассмотрим в отношении таких специалистов как судовые механики и электромеханики - эта сфера деятельности наиболее близка авторам настоящей статьи.

Управление безопасной эксплуатацией МАНС в различных режимах работы в разрешенных районах эксплуатации должно осуществляться из Центра Дистанционного Управления (ЦДУ).

Структурно ЦДУ - это целостная система, включающая в себя следующие объекты: разрешенные районы ЦДУ, контролируемое оборудование, персонал, контролируемые суда, контролирующую разграничивающую движение разметку, подчиненные (мобильные) ЦДУ, системы безопасности, пожарной безопасности, кибербезопасности, отвечающие всем требованиям к осуществлению автономной (дистанционно управляемой) навигации. ЦДУ должен быть укомплектован персоналом согласно штатному расписанию и количеству контролируемых судов.

В составе персонала ЦДУ, непосредственно обеспечивающего мониторинг, контроль и управление МАНС (командный состав ЦДУ), должны быть предусмотрены как минимум следующие должности:

- капитан (аналогично капитану судна с экипажем);
- оператор (вахтенный офицер) (не ниже старшего помощника капитана - квалификация «уровень управления»);
- инженер-механик (аналогично старшему механику (электромеханику) - квалификация «уровень управления»);
- оператор (вахтенный механик) (не ниже второго механика - квалификация «уровень управления»);
- инженер по связи (аналогично радиоэлектронику - квалификация «уровень управления»).

Все члены командного состава должны иметь рабочий диплом, соответствующей квалификации, полученный на базе высшего морского образования (специалитет).

Дипломирование командного состава должно соответствовать требованиям для аналогичных должностей экипажей судов. Кроме того

- инженер-механик и инженер-электромеханик должны пройти тренажерную подготовку по контролю и управлению системами

МАНС, работающих в режиме дистанционного управления и автономном режиме, для всех типов судов, контроль которых осуществляется ЦДУ, и иметь действующее свидетельство о прохождении подготовки (не старше 5 лет);

- инженер по связи должен пройти тренажерную подготовку по управлению средствами связи в разрешенных районах действия ЦДУ для всех разрешенных типов МАНС и разрешенных районов действия ЦДУ, контроль которых осуществляется ЦДУ, и иметь действующее свидетельство о прохождении подготовки (не старше 5 лет).

Требования «Положения...» о МАНС в отношении СЭУ применяются к:

- системе автоматического электроснабжения,
- системам автоматизации и управления,
- системе искусственного интеллекта.

Система автоматического электроснабжения должна включать с необходимым резервированием следующее оборудование: первичные двигатели с системой запуска; редукторы (при необходимости); генераторы; трансформаторы; преобразователи частоты; распределительный щит электропитания; источники бесперебойного питания; кабели; системы автоматического управления; вспомогательные системы, обслуживающие вышеуказанное оборудование.

Для управление СЭУ предусматриваются следующие возможности: с местных постов управления (если применимо); с судового поста дистанционного управления; с помощью судовой системы искусственного интеллекта; из внешнего центра дистанционного управления.

Для обеспечения работы СЭУ должно быть предусмотрено управление с помощью судовой системы искусственного интеллекта и из ЦДУ: в нормальных эксплуатационных условиях полномочия ЦДУ имеют самый высокий уровень, а полномочия системы искусственного интеллекта находятся в его ведении; в нормальных эксплуатационных условиях ЦДУ может делегировать управление системе искусственного интеллекта СЭУ, имея при этом средства для обеспечения эффективного дистанционного управления основным оборудованием из ЦДУ в случае отказа системы искусственного интеллекта СЭУ; в случае неустойчивой связи управление производится с помощью системы искусственного интеллекта СЭУ. В случае появления устойчивой связи управление, производимое ЦДУ, является приоритетным над управлением с помощью системы искусственного интеллекта СЭУ.

Система искусственного интеллекта СЭУ осуществляет контроль состояния и управления двигателями и их системами, вспомогательными механизмами, системами электроснабжения в соответствии с планом их технического обслуживания и осмотра, а также с учетом рейсового задания судна (маршрута/длительности стоянки).

Система искусственного интеллекта СЭУ должна получать информацию о параметрах работы следующих основных систем установки и их устройств: топливной системы, масляной системы, системы охлаждения, системы сжатого воздуха, гидравлической системы, системы воздухоподдачи,

питательной системы, системы продувки и конденсации, системы вентиляции, балластной системы, систем пожаротушения, осушительной системы, при необходимости: грузовой системы, зачистной системы и систем охлаждения, подогрева, вентиляции груза и инертного газа и т.д.

Эффективность алгоритмов работы, функций управления и контроля системы искусственного интеллекта СЭУ проверяются в ходе стендовых, швартовых и ходовых испытаний, а также при проведении освидетельствований Регистром.

Уровень безопасности, надежности, степень автоматизации судовой энергетической установки не должны быть ниже уровня безопасности, надежности и степени автоматизации судна с экипажем.

А безопасность управления с помощью системы искусственного интеллекта СЭУ должна быть выше, чем безопасность судов с обслуживаемым машинным отделением

Для обеспечения кибербезопасности как на борту МАНС, так и в ЦДУ персонал должен знать мероприятия и процедуры:

- по обнаружению вторжений в информационную сеть,
- по обеспечению необходимого, достаточного и избыточного уровня кибербезопасности.

Следует обратить внимание на тот факт, что с внедрением МАНС существенно изменяются состав и функциональные возможности средств радиосвязи и обмена данными.

Так средства радиосвязи и обмена данными МАНС должны обеспечивать радиосвязь и обмен данными с другими судами, Центром Дистанционного Управления (ЦДУ), береговыми службами, СУДС, поисково-спасательным центром, владельцем и оператором судна как напрямую, так и через ЦДУ в течение всего рейса с качеством, обеспечивающим его безопасность и эффективность, и решать, как минимум, следующие задачи (несколько отличающиеся для автономного и дистанционного управления судном):

- передача (при необходимости либо по запросу) в ЦДУ информации об условиях окружающей среды;
- обмен данными с другими судами;
- взаимный обмен информационными потоками для корректировки маршрута движения судна в целом;
- взаимный обмен информационными потоками для корректировки параметров движения на отдельных участках маршрута;
- взаимный обмен информационными потоками для гарантированного доведения команд управления в системы управления движением и маневрированием судна по данным о навигационной обстановке и данным о движении МАНС на основе оптического, радиолокационного и спутникового наблюдений;
- взаимный обмен информационными потоками для гарантированного доведения команд дистанционного управления общесудовыми средствами палубными механизмами, главной и вспомогательной энергетической установкой, электростанцией по данным контроля состояния технических средств судна;

- передача аварийных сообщений, если система управления зафиксировала, что безопасность судна не может быть поддержана на соответствующем уровне;
- прием из ЦДУ инструкций для эксплуатации судовых систем в случае нештатных ситуаций;
- передача команд для активации и деактивация режима автономного управления (переход в режим дистанционного управления);
- передача информации по контролю состояния технических средств, груза и экологической обстановки;
- прием карт и корректур электронной картографической навигационной информационной системы;
- передача другим судам данных о параметрах движения, состоянии энергетической установки, системы управления, связи;
- передача в ЦДУ данных, хранимых на сервере автономного судна;
- и др.

Для обеспечения передачи столь большого массива информации и бесперебойной работы оборудования в составе персонала ЦДУ предусматривается должность радиоинженера. Как нам представляется, это должен быть не просто радиоинженер, а специалист, знающий морскую специфику.

Заключение

Морское сообщество, как исследовательское, так и промышленное, работает над увеличением доли беспилотных систем, в том числе полноразмерных морских судов. Уровни управления этих МАНС различаются: от удаленного управления за пределами прямой видимости до почти полной автономии на судах-прототипах. Однако эксплуатация таких судов на всех уровнях контроля требует решения ряда вопросов, касающихся

сохранности оборудования, потенциальных грузов и безопасности других морских пользователей.

Наличие судов без экипажей уже реальность и должен быть разработан ряд нормативных документов, включая не только техническую составляющую, но и образовательный аспект.

Для управления МАНС наиболее целесообразным является подготовка специалистов из числа практиков, имеющих опыт работы на судах.

С учетом возрастающей потребности специалистов в рассматриваемой области следует предусмотреть в программах обучения приобретение слушателями гуманитарной компоненты направленной на совершенствование форм и содержания практики, создания основ профессионального взаимодействия с инженерным сообществом.

Практико-ориентированный подход, предполагающий тесную взаимосвязь теории и практики должен обеспечить принципиально новую модель практической подготовки обучающихся. Это создаст необходимые условия адаптации к новым формам управления и обслуживания флота.

На уровне образовательного стандарта следует предусмотреть приобретение обучающимися культуры профессионального общения. Необходимо формирование компетенций слушателей, которые обеспечат выпускнику личностную и профессиональную самореализацию.

Необходимо расширить подготовку специалистов плавсостава в вопросах автоматизации, распределённых компьютерных систем, кибербезопасности, искусственного интеллекта и т.п.

При этом такая подготовка должна осуществляться как в процессе обучения специалистов, так и совершенствоваться в системе повышения квалификации.

Вполне очевидно, что необходимо рассматривать вопрос о создании тренажеров по управлению МАНС.

Литература

1. Дмитриев В.И., Каретников В.В., Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2017. Том. 9, № 6, С. 1149-1158.
2. Фролов В.Н., Севбо В.Ю., Ануфриев И.Е., Технологии безэкипажного судовождения // Транспорт Российской Федерации, 2018. Том. 4, № 77, С. 17-18.
3. Судостроение. инфо, "Проблемы и перспективы безэкипажных судов", 26.06.2017. Интернет ресурс: <https://sudostroenie.info/novosti/19589.html>. Дата доступа: 01.06.2021.
4. Allianz Global Corporate & Specialty SE, "Safety and shipping review," Allianz, Munich, Germany, 2018.
5. Фадевин Г.А. Развитие безэкипажного судоходства // Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений: сборник статей по материалам XIII студенческой межвузовской научно-технической конференции, Севастополь, 2018.
6. Сысоев С. "Робот-парусник впервые пересек Атлантику," ООО "Фэшн Пресс", Москва, РФ, 04 09 2018. Интернет ресурс: <https://www.porpmech.ru/technologies/439612-robot-parusnik-vpervye-peresek-atlantiku/>. Дата доступа: 01.06.2021.
7. Yara International ASA, "Yara Birkeland press kit," Yara International ASA, Oslo, Norway, 11 2020. Интернет ресурс: <https://www.yara.com/news-and-media/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>. Дата доступа: 01.06.2021.
8. IBM, "The Mayflower Autonomous Ship," IBM, 16 10 2019. Интернет ресурс: <https://newsroom.ibm.com/then-and-now>. Дата доступа: 01.06.2021.
9. DIMECC Oy, "ONESEA - Autonomous Maritime Ecosystem," Opus Capita Solutions Oy, Finland, 06 2021. Интернет ресурс: <https://www.oneseaeacosystem.net/>. Дата доступа: 01.06.2021.
10. О. Гненной, "а-Навигация или Как развиваются в России автономные суда?," 05 04 2021. Интернет ресурс: https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya_ili_kak_razvivayutsya_v_rossii_avtonomnye_suda.html. Дата доступа: 01.06.2021.
11. Дальневосточная Ассоциация Морских Капитанов., "Инфобюллетень №13 (2019)," ДВАМК, 29 04 2019. Интернет ресурс: <https://kapitanydv.ru/news-%E2%84%9613-2019/>. Дата доступа: 01.06.2021.

12. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. Интернет ресурс: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>. Дата доступа: 01.06.2021.
13. Rolls-Royce Marine, "Autonomous ships. The next step.," Rolls-Royce plc., 2016. Интернет ресурс: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf>. Дата доступа: 01.06.2021.
14. Российский морской регистр судоходства, "Новости," РМРС, 30 06 2020. Интернет ресурс: <https://rs-class.org/news/general/rs-opublikoval-polozheniya-po-klassifikatsii-avtonomnykh-sudov/>. Дата доступа: 01.06.2021.
15. Korabel.ru, "Через полтора года ОСК сможет представить первые проекты безэкипажных судов" 04.06.2018. Интернет ресурс: https://www.korabel.ru/news/comments/chez_poltora_goda_osk_smozhet_predstavit_pervye_proekty_bezkipazhnykh_sudov.html. Дата доступа: 01.06.2021.

References

1. Dmitriev V.I., Karetnikov V.V., Metody obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya pri vnedrenii bespilotnykh tekhnologiy [Methods of ensuring safety of navigation in the implementation of unmanned technologies]// Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2017. Tom. 9, № 6, S. 1149-1158.
2. Frolov V.N., Sevbo V.Yu., Anufriev I.E., Tekhnologii bezkipazhnogo sudovozhdeniya [Technology unmanned navigation]// Transport Rossiyskoy Federatsii, 2018. Tom. 4, № 77, S. 17-18.
3. Sudostroenie. info, "Problemy i perspektivy bezkipazhnykh sudov", ["Problems and prospects of unmanned vessels"] 26.06.2017. Internet resurs: <https://sudostroenie.info/novosti/19589.html>. Data dostupa: 01.06.2021.
4. Allianz Global Corporate & Specialty SE, "Safety and shipping review," Allianz, Munich, Germany, 2018.
5. Fadevnn G.A. Razvitiye bezkipazhnogo sudokhodstva [Development of unmanned shipping]// Sovershenstvovanie proektirovaniya i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzheniy: sbornik statey po materialam XIII studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sevastopol', 2018.
6. Sysoev S. "Robot-parusnik vpervye peresek Atlantiku," ["The robot sailboat crossed the Atlantic for the first time"] ООО "Feshn Press", Moskva, RF, 04 09 2018. Internet resurs: <https://www.popmech.ru/technologies/439612-robot-parusnik-vpervye-peresek-atlantiku/>. Data dostupa: 01.06.2021.
7. Yara International ASA, "Yara Birkeland press kit," Yara International ASA, Oslo, Norway, 11 2020. Internet resurs: <https://www.yara.com/news-and-media/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>. Data dostupa: 01.06.2021.
8. IBM, "The Mayflower Autonomous Ship," IBM, 16 10 2019. Internet resurs: <https://newsroom.ibm.com/then-and-now>. Data dostupa: 01.06.2021.
9. DIMECC Oy, "ONESEA - Autonomous Maritime Ecosystem," Opus Capita Solutions Oy, Finland, 06 2021. Internet resurs: <https://www.oneseaecosystem.net/>. Data dostupa: 01.06.2021.
10. O. Gnennoy, "a-Navigatsiya ili Kak razvivayutsya v Rossii avtonomnye suda?," 05 04 2021. Internet resurs: https://www.korabel.ru/news/comments/a-navigaciya_ili_kak_razvivayutsya_v_rossii_avtonomnye_suda.html. Data dostupa: 01.06.2021.
11. Dal'nevostochnaya Assotsiatsiya Morskikh Kapitanov., "Infobyulleten' №13 (2019)," DVAMK, 29 04 2019. Internet resurs: <https://kapitanydv.ru/news-%E2%84%9613-2019/>. Data dostupa: 01.06.2021.
12. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. Интернет ресурс: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>. Дата доступа: 01.06.2021.
13. Rolls-Royce Marine, "Autonomous ships. The next step.," Rolls-Royce plc., 2016. Интернет ресурс: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf>. Дата доступа: 01.06.2021.
14. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, "Novosti," РМРС, 30 06 2020. Интернет ресурс: <https://rs-class.org/news/general/rs-opublikoval-polozheniya-po-klassifikatsii-avtonomnykh-sudov/>. Дата доступа: 01.06.2021.
15. Korabel.ru, "Cherez poltora goda OSK smozhet predstavit' pervye proekty bezkipazhnykh sudov" " ["In a year and a half, USC will be able to present the first projects of unmanned vessels"] 04.06.2018. Интернет ресурс: https://www.korabel.ru/news/comments/chez_poltora_goda_osk_smozhet_predstavit_pervye_proekty_bezkipazhnykh_sudov.html. Дата доступа: 01.06.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Иванович Олейников, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплотехники, судовых котельных и вспомогательных установок» Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: mokondo@mail.ru

Boris I. Oleynikov, senior lecturer, PhD (Eng), Professor of Department «Thermal Engineering», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: mokondo@mail.ru

Иван Иванович Костылев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехники, судовых котельных и вспомогательных установок» Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostylevii@gumrf.ru

Ivan I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Head of Department of «Thermal Engineering», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostylev@gumrf.ru

Дмитрий Викторович Коняев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехники, судовых котельных и вспомогательных установок» Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: koniaevdv@gumrf.ru

Александр Павлович Петров, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Двигателей внутреннего сгорания и автоматизации судовых энергетических установок», доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: petrovap@gumrf.ru

Dmitry V. Koniaev, senior lecturer, PhD (Eng), Department of «Thermal Engineering», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: koniaevdv@gumrf.ru

Alexander P. Petrov, senior lecturer, PhD (Eng), Professor of Department «Internal combustion engines and ship power plants automation», Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: petrovap@gumrf.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 656.6:338.47

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.026>

Интеллектуализация транспортной системы Северного морского пути

И.В. Гурлев¹, e-mail: gurleff@mail.ru, А.А. Макоско², e-mail: aamacosco@mail.ru,

И.Г. Малыгин^{1,3}, e-mail: malygin_com@mail.ru, В.Ю. Каминский¹, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, ³Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России (СПб УГПС МЧС России)

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые направления создания и развития интеллектуальной транспортной системы Северного морского пути (СМП). Показано значение СМП в рамках комплексного освоения территории Российской Федерации, приведена его структура. В настоящее время СМП функционирует как внутренний транспортный коридор. Одним из недостатков СМП является небольшая глубина морского канала, что требует проведения соответствующих работ или изменения маршрута. Отмечается влияние изменения погодных-климатических условий в Арктике на транспортную систему СМП. Показаны преимущества использования СМП в качестве международного транзитного транспортного коридора по сравнению с южным маршрутом через Суэцкий канал. Перечислены направления развития Северного морского пути как транспортной системы на основе цифрового усовершенствования инфраструктуры, навигационного, энергетического и информационно-телекоммуникационного обеспечения, а также интеллектуализации производственных процессов на базе беспилотного мультимодального транспорта. Утверждается, что внедрение цифровых технологий на СМП превратит его в один из самых высокотехнологичных и эффективных транспортных коридоров в мире.

Ключевые слова: Северный морской путь, транспортная система, преимущества, недостатки, цифровизация, интеллектуализация.

Intellectualization of the transport system of the Northern sea route

Igor V. Gurlev¹, e-mail: gurleff@mail.ru, Alexander A. Makosko², e-mail: aamacosco@mail.ru,

Igor G. Malygin^{1,3}, e-mail: malygin_com@mail.ru, Valery Yu. Kaminsky¹, Kaminskyvy@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation,

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences

³Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia

Abstract. The article considers some directions of creation and development of the intelligent transport system of the Northern Sea Route (NSR). The significance of the NSR in the framework of the integrated development of the territory of the Russian Federation is shown, its structure is given. Currently, the NSR functions as an internal transport corridor. One of the disadvantages of the NSR is the small depth of the sea channel, which will require appropriate work or route changes. The influence of changes in weather and climatic conditions in the Arctic on the transport system of the NSR is noted. The advantages of using the NSR as an international transit transport corridor in comparison with the southern route through the Suez Canal are shown. The directions of the development of the Northern Sea Route as a transport system based on the digital improvement of infrastructure, navigation, energy, information and telecommunications support, as well as the intellectualization of production processes based on unmanned multimodal transport are listed. It is argued that the introduction of digital technologies on the NSR will turn it into one of the most high-tech and efficient transport corridors in the world.

Keywords: Northern Sea Route, transport system, advantages, disadvantages, digitalization, intellectualization.

Введение

Северный морской путь (СМП), как транспортная система – это организованная совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих объектов транспортной инфраструктуры, созданная для осуществления перевозок. Таким образом, целью Северного морского пути является бесперебойная перевозка грузов, почты и пассажиров в пункты назначения.

В структуру транспортной системы СМП входят:

- транспортная инфраструктура – совокупность всех объектов транспорта и предприятий транспорта, как выполняющих перевозки, так и обеспечивающих их выполнение и обслуживание;

- транспортные предприятия – производственные предприятия, основной задачей которых является перевозка грузов и пассажиров;

- транспортные средства – серийно и/или специально построенные средства, предназначенные для перевозки людей и/или грузов в зоне СМП;

- управление транспортной системы – контроль над транспортной системой: информация о состоянии СМП, погоде, движении судов (морских, речных и воздушных); соблюдение правил безопасной навигации и правил оплаты ледокольного сопровождения судов; доставка грузов в порты мультимодальным транспортом и т.п.

Проблема функционирования СМП, как одной из инфраструктурных транспортных ветвей Мегaproекта по комплексному освоению территории Российской Федерации, входящей в состав транспортных пространственно-логистических коридоров, становится также одной из самых актуальных в проблематике внутренних и глобальных транзитных перевозок [1-5].

Целью данной статьи является рассмотрение некоторых направлений создания и развития интеллектуальной транспортной системы СМП с учетом различных социально-экономических и других факторов.

Результаты исследования

На функционирование и развитие транспортной системы СМП, как внутреннего, так и международного транзитного транспортного коридора, влияет множество факторов:

кадровые – наличие необходимого количества специалистов;

образовательные – соответствующий уровень профессиональной подготовки персонала;

климатические – учет влияния погодноклиматических факторов на бесперебойное функционирование транспортной системы;

географические – учет местоположения объектов транспортной системы для обеспечения связи и навигации;

экономические – учет возможностей выделения необходимых инвестиций на функционирование и развитие СМП, а также обеспечение его рентабельности;

технические – наличие необходимого количества техники и технологических возможностей как в портах, так и на всем протяжении СМП для обеспечения функционирования транспортной системы;

геополитические факторы – наличие благоприятной международной обстановки и проводимой политики для обеспечения нормального функционирования транспортной системы СМП [6].

В настоящее время глобальным морским транзитным коридором между странами

Европейского союза (ЕС) и Восточноазиатскими государствами является южный маршрут через Суэцкий канал. Однако блокировка на 7 дней в марте 2021 года данной транспортной артерии контейнеровозом «Ever Given» ставит вопрос о создании действующего альтернативного транспортного пути, свободного от необходимости ожидания очереди прохода в случае возможного повторения блокировки канала и обеспечивающего сокращение времени доставки.

Использование СМП в качестве международного транзитного транспортного коридора вдоль северного побережья России по сравнению с южным маршрутом через Суэцкий канал обеспечивает ряд преимуществ:

- значительное сокращение продолжительности рейса;
- существенное уменьшение расходов на покупку топлива;
- уменьшение расходов на оплату персонала;
- уменьшение расходов на оплату фрахта судна;
- отсутствие ограничений по габаритам судна;
- полное отсутствие угрозы нападения пиратов;
- бесплатный проход судна по Северному морскому пути, но при обязательной оплате ледокольного сопровождения.

Одним из недостатков транспортной системы СМП является небольшая глубина морского канала возле Новосибирских островов – около 12 метров, что потребует проведения соответствующих работ или изменения маршрута (рис. 1).

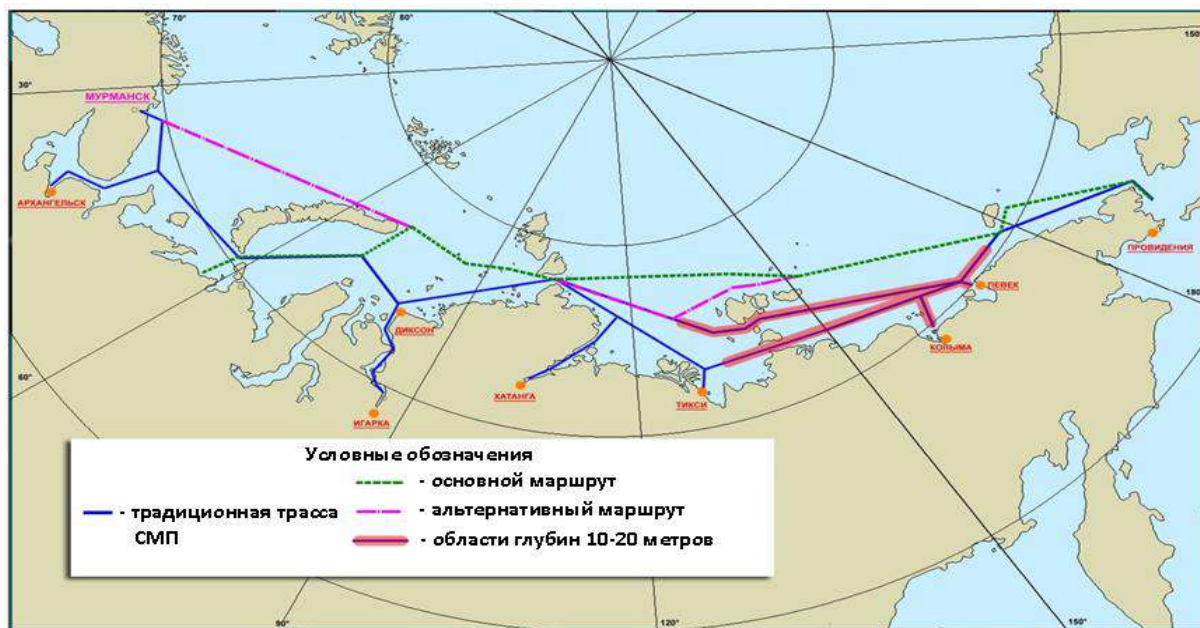


Рис. 1. Маршрут для транзитного перехода по трассам Северного морского пути крупнотоннажных танкеров с осадкой 15,5 метров (зеленый пунктир)

Основными портами, расположенными на северном маршруте, включающем СМП, являются: Мурманск, Архангельск, Нарьян-Мар, Сабетта, Яр-Сале, Тазовский, Диксон, Игарка, Хатанга, Тикси, Зеленый Мыс, Певек, Мыс Шмидта, Бухта Провидения, Петропавловск-Камчатский, Владивосток.

Крупными российскими пользователями услуг перевозок по Северному морскому пути являются

«Газпром», «Норильский никель», «Лукойл», «Роснефть», «Новатэк» и др. компании.

В настоящее время СМП практически выполняет роль внутреннего транспортного коридора, о чем свидетельствуют данные по объемам ежегодных внутренних и транзитных грузоперевозок по СМП, приведенные в табл.1 [7].

Таблица 1

Динамика грузоперевозок по СМП

Годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Внутренний грузопоток (млн. тонн)	4,0	6,0	7,0	10,0	20,0	31,0	32,0
Транзитный грузопоток (млн. тонн)	0,25	0,05	0,22	0,20	0,50	0,70	1,30

Как следует из табл.1 в настоящее время основу грузопотоков по СМП составляют внутренние грузоперевозки для обеспечения потребностей населенных пунктов и деятельности предприятий на Крайнем Севере, которые в 2020 г. возросли в 8 раз по сравнению с 2014 г. За тот же период транзитный грузопоток вырос более чем в 5 раз, однако остается существенно незначительным и достаточно нестабильным.

Наблюдаемые изменения погодно-климатических условий в Арктике также влияют на транспортную систему СМП. Все более раннее очищение весной от льда прибрежных районов Северного ледовитого океана и затяжная осень удлиняют период арктической навигации не только на СМП, но и на связанном с ним речном транспорте. Более доступными для плавания становятся высокоширотные трассы, на которых появится возможность круглогодичной навигации. При этом сохранение морских льдов в течение части года, и вероятность возникновения сложных ледовых условий требуют сохранения и развития российского ледокольного флота.

Оценки, предполагающие исчезновение многолетнего морского льда к середине XXI века при реализации «жестких» сценариев антропогенного воздействия, на сегодняшний день не представляются нереалистичными. Наблюдаемое и далее ожидаемое потепление в арктической зоне в целом благоприятно для морской хозяйственной деятельности, включая судоходство и добычу углеводородов на шельфе [8,9].

В соответствии с «майским» 2018 года Указом Президента Российской Федерации Правительству Российской Федерации поручено подготовить и утвердить комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры СМП, предусматривающий обеспечение к 2024 году увеличение грузопотока по нему до 80 млн. тонн [10].

Для достижения поставленных целей по грузопотоку Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот) Министерства транспорта РФ подготовило проект плана-графика реализации федерального проекта «Северный морской путь», согласно которому на развитие и поддержку СМП в 2019-2024 годах требуется 905,6 миллиарда рублей. Из них бюджетное финансирование должно составить 305 миллиардов рублей. Остальные 600,6 миллиарда рублей – внебюджетное финансирование [11].

Техническое переоснащение портов, ввод в эксплуатацию новых атомных ледоколов, навигационно-техническое оснащение СМП, гарантированный срок круглогодичного прохождения северного транзитного маршрута дадут возможность увеличить объем внутренних и транзитных перевозок, и превратить СМП в важный глобальный транзитный транспортный коридор.

Навигация по СМП осуществляется, как правило, в течение 3-5 месяцев в году в зависимости от ледовой обстановки.

На сегодня среднее время ледокольной проводки судов от Мурманска до Бухты Провидения в период навигации составляет 10,6 суток.

Построенный для реализации проекта «Ямал-СПГ» первый из серии в 15 танкеров-газовозов ледокольного класса танкер «Кристоф де Маржери» (Christophe de Margerie), принадлежащий ПАО «Совкомфлот», совершил в период 11-17 августа 2017 года тестовый рейс по СМП от мыса Желания на архипелаге Новая Земля до мыса Дежнева на Чукотке за 6,5 суток без ледокольного сопровождения.

Для существенного увеличения сроков навигации по СМП в России строятся и близки к сдаче в эксплуатацию атомные ледоколы проекта 22220 (ЛК-60Я) «Арктика», «Сибирь» и «Урал» мощностью по 60 МВт [12].

С целью обеспечения бесперебойной круглогодичной навигации по всей трассе СМП в настоящее время в России проектируется сверхмощный ледокол серии «Лидер» проекта 10510 (ЛК-110Я, ЛК-120Я) мощностью 110-120 МВт. Для решения поставленной задачи необходимо построить и сдать в эксплуатацию три ледокола серии «Лидер», которые смогут пробиваться через ледовые поля толщиной 4,3 метра и прокладывать судходный канал шириной до 50 метров для прохода каравана крупнотоннажных судов со скоростью 5-10 узлов, а при толщине льда 3,5 метра средняя скорость будет составлять 15 и более узлов. Постройка первого ледокола серии «Лидер» предполагается не позднее 2030 года.

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года [13] строительство мощных атомных ледоколов для осуществления круглогодичной навигации на СМП, дизель-электрических ледоколов для обслуживания месторождений на шельфах арктических морей, населенных пунктов на побережье Северного Ледовитого океана и в устьях сибирских рек; многофункциональных аварийно-спасательных судов, буксиров, технических средств спасания с морских нефтегазовых объектов в экстремальных климатических условиях позволит создать полноценные возможности круглогодичного обеспечения и сопровождения внутренней перевозки и транзита на СМП [14].

Также для сокращения протяженности пути в расчете на проектируемые сверхмощные атомные ледоколы серии «Лидер» в настоящее время разрабатывается новый высокоширотный международный транзитный маршрут, проходящий севернее Новой Земли, островов Северная Земля, Новосибирских островов и острова Врангеля (рис. 2).



Рис. 2. Высокоширотная трасса для транзитного перехода по трассам Северного морского пути

В силу естественного интеллектуального и технического прогресса внедрение цифровых технологий во все сферы деятельности становится важной частью современной социально-экономической жизни страны.

Цифровая экономика, как система инновационных экономических отношений высокой эффективности, обеспечиваемая за счет создания искусственного интеллекта, автоматизации, роботизации процессов и технологий обработки данных, остро необходима для повышения производительности труда и увеличения выпуска отечественных товаров, продуктов питания в стране и в целом повышения жизненного уровня населения.

Необходимыми составляющими цифровой экономики являются: интернет вещей, машинное обучение, системы мониторинга, кибернетические системы, блокчейн, нейронные сети, робототехника и многое другое. Эти инструменты способствуют цифровизации и интеграции всех потоков данных при формировании информационного общества и цифровой экономики. Создание цифровых платформ управления экономикой – решение стратегически важной задачи, которая позволит обеспечить ускоренное развитие страны на основе качественно иного уровня экономики по составу и структуре [15].

Внедрение цифровых технологий на СМП превратит его в один самых высокотехнологичных и эффективных транспортных коридоров в мире. Основным направлением создания и развития интеллектуальной транспортной системы СМП является цифровизация многих производственных процессов, в том числе разработка и создание беспилотных грузовых автомобилей и безэкипажных судов для обслуживания различных объектов СМП. Уже сейчас в зоне СМП активно используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и подводные роботы.

На Восточно-Мессояхском месторождении в апреле 2020 г. были успешно завершены группой компаний «КАМАЗ» совместно с ПАО «Газпром нефть» испытания беспилотных грузовых автомобилей на трассе более 2,5 тыс. км.

Беспилотные автомобили, как пример обучения и работы нейронных компьютерных сетей, показали свои инновационные технологические возможности: умение с высокой точностью передвигаться по заданным маршрутам; умение обмениваться информацией через дублируемые сети связи, распознавать препятствия на дороге, прогнозировать траекторию движения с учетом обстановки. Контроль беспилотных автомобилей по территории нефтепромысла и зимникам осуществляется из единого центра управления. Тестирование подтвердило преимущества использования беспилотников: снижение издержек на 10-15%; повышение безопасности вождения на 50%; увеличение скорости доставки на 50%; неограниченную работоспособность; также при тестировании беспилотники не ошибались в условиях низких температур и плохой видимости [16].

Ведутся работы по созданию безэкипажных/беспилотных судов различного назначения: для технических работ в портах, обслуживания добывающих предприятий по доставке грузов, каботажного плавания, научных исследований океана и др. [17,18].

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 декабря 2020 № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации» будут проводиться испытания беспилотных судов в 11 субъектах страны, в том числе в Мурманской, Магаданской, Сахалинской областях и Приморском крае [19].

Предполагается, что в результате внедрения беспилотных судов сократится число морских аварий, т.к. до 90% происшествий обусловлено «человеческим фактором». Также судовладельцы смогут сократить до 15-30% операционных затрат, что позволит покрыть дефицит высококвалифицированных моряков, который сейчас достигает 20% от требуемого количества работников. Однако полностью автономными суда быть не могут, поскольку установленное оборудование требует постоянного контроля

специалистов. Например, видекамера, установленная на корабле, не всегда может дать четкое изображение оператору, находящемуся на станции управления, особенно в условиях плохой видимости или при сбоях в связи. В таком случае присутствие на судне квалифицированных сотрудников необходимо, чтобы своевременно заметить опасность и предотвратить ее последствия. Учитывая сложные условия навигации на СМП, от скорости принятия решения капитаном может зависеть жизнеспособность судна [20].

Для широкого использования беспилотного наземного и морского транспорта в Арктической зоне России необходимо наличие постоянного информационно-телекоммуникационного трафика, обеспечить который в условиях высоких широт в населенных пунктах, на морских коммуникациях и портах СМП в полной мере могут только спутники связи.

Телекоммуникационный и информационный ресурс российского рынка космической связи технологии VSAT в Арктической зоне Российской Федерации практически полностью обеспечивается геостационарными спутниками двух компаний: ФГУП «Космическая связь» (космические аппараты серии «Экспресс-AM») и ОАО «Газпром космические системы» (космические аппараты серии «Ямал») до 70-75 градусов северной параллели. Российские системы спутниковой связи и вещания работают, в основном в «С» (от 3400 до 5250 МГц) и «Ku» (от 10700 до 12570 МГц) -диапазонах.

В последние годы происходит переход спутниковой связи технологии VSAT на более высокочастотный Ka-диапазон, однако для обеспечения устойчивой связи выше 70-75 градусов северной широты необходимы системы космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах. Определение местонахождения судов происходит в том числе с помощью российской спутниковой группировки ГЛОНАСС [21].

С 2024 г. должна заработать новейшая отечественная система гражданской спутниковой связи «Экспресс-РВ» разработки ФГУП «Космическая связь», четыре космических аппарата которой будут выведены на высокоэллиптические орбиты, что позволит обеспечить услугами связи всю территорию России, Арктическую зону и СМП. Для получения сведений о погоде в любой точке Арктической зоны России, необходимых для успешной навигации, 28 февраля 2021 г. был запущен первый из двух гидрометеорологических

спутников «Арктика-М», позволяющий получать информацию о погоде в заданном районе каждые 15-30 минут [22].

В этом экологически хрупком регионе решение энергетического обеспечения производственных предприятий, портов, наземных и подводных линий оптической связи, станций линий радиорелейной и тропосферной связи и других объектов будет возлагаться на экологически чистые и надежные атомные станции малой мощности (АСММ) и плавучие атомные тепловые электростанции (ПАТЭС). Первая ПАТЭС «Михаил Ломоносов» из планируемых шести уже установлена возле порта Певек [23].

Заключение

Сибирь, Дальний Восток и Арктическая зона России, являющиеся стратегическим направлением экономического развития страны, требуют бесперебойного транспортного обеспечения грузоперевозок прежде всего для социально-экономического развития самой России.

Для скорейшей и полной реализации экономической и геополитической роли СМП, как внутреннего транспортного коридора, так и находящегося под контролем России международного транзитного транспортного коридора, необходимо превращение транспортной системы СМП в интеллектуальную транспортную систему с повсеместным внедрением цифровизации и интеллектуализации организации производственных процессов грузоперевозок. Для этого требуются крупные инвестиции в обеспечение безопасности Арктической зоны России, модернизацию инфраструктуры портов, постройку достаточного количества ледоколов обеспечивающих круглогодичную навигацию, информационно-телекоммуникационное и навигационное обеспечение безопасного мореплавания, энергетическое обеспечение, внедрение беспилотного мультимодального транспорта и т.п. [3].

Вместе с тем с целью привлечения внимания крупных судовладельцев, в том числе иностранных, к использованию СМП в качестве международного транзитного коридора немаловажную роль в современном мире играет обоснование в средствах массовой информации его экономической эффективности и репутации, как района круглогодичного и безопасного мореплавания.

Литература

1. Комплексное освоение территории Российской Федерации на основе транспортных пространственно-логистических коридоров. Актуальные проблемы реализации мегапроекта «Единая Евразия: ТЕПР – ИЕТС» / Отв. ред. академик РАН В.В. Козлов, чл.-корр. РАН А.А. Макоско; Российская академия наук. – М.: Наука. 2019. – 463 с.
2. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и 3 этапа развития до 2050 года / Монография под ред. А.А. Макоско. – М.: ИПТ РАН. 2019. – 465 с.
3. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В. От Северного морского пути к Арктическому интеллектуальному мультимодальному транспортному коридору Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2020. Материалы Юбилейной междунар. научно-практ. конф. 10-11 ноября 2020 г. – СПб.: ИПТ РАН. Т. 1. – С. 8-14.
4. Малыгин И.Г., Гавкалюк Б.В. Вопросы устойчивого функционирования транспортного комплекса Арктической зоны Российской Федерации при чрезвычайных ситуациях // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и

- современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе. Сборник трудов междунар. научно-практ. конф. Санкт-Петербург, 28 окт. 2020 г. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России. 2020. – С. 7-9.
5. Asaul M., Malygin I., Asaul A., Mohov A., Komashinskiy V., Y. Seliverstov. Linking Eurasian Integration with the Silk Road Economic Belt in the context of water transport // *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 131. "New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development" (NSRBCPED 2019). P.237-240. Copyright © 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.
 6. Лукин Ю.Ф. Анализ деятельности Северного морского пути // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. Том 18. Выпуск № 3. 2015. – С. 467-475.
 7. Северный морской путь. Итоги 2020 года. Макеты инфографики // РОСАТОМ. Москва. 19 января 2021 года. 24 с. URL: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf> (дата обращения: 19.04.2021).
 8. Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 468. – № 6. – С. 699-704.
 9. Кибанова О.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Хон В.Ч. Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчётам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 481. – № 1. – С. 88-92.
 10. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
 11. Минтранс ожидает 900 миллиардов рублей инвестиций в развитие Севморпути. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/1085> (дата обращения: 27.06.2021).
 12. Бордученко Ю.Л., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю., Аксёнов В.А. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути // *Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» (Моринтех)*, №2(52). Т.1 2021. С. 14-25.
 13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года».
 14. Куватов В.И., Козьмовский Д.В., Шаталова Н.В. Потенциал Северного морского пути Арктической зоны России. Факторы и стратегия развития // *Интернет-журнал «Науковедение»*, 20TVN614. № 6 (25), ноябрь-декабрь 2014. – 16 с.
 15. Гурлев И.В. Цифровизация экономики России и проблемы роботизации // *Вестник Евразийской науки*, 08ECVN420. № 4 (12), июль-август 2020. – 12 с.
 16. Беспилотники КАМАЗ прошли испытания в Арктике. URL: https://kamaz.ru/press/releases/bespilotniki_kamaz_proshli_isspytaniya_v_arktike/ (дата обращения: 02.06.2020).
 17. Кондратьев А.И., Худяков О.А., Попов А.Н. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России // *Транспорт. TRANSPORT BUSINESS IN RUSSIA*. № 6. 2016. – С. 138-140.
 18. Фролов В.И., Севбо В.Ю., Ануфриев И.Е. Технологии безэкипажного вождения // *Транспорт Российской Федерации*. № 4 (77). 2018. – С. 17-21.
 19. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.12.2020 № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации».
 20. Гайва Е.В. Работа подключат к штурвалу. Россия создаст флот судов без экипажей. URL: <https://rg.ru/2020/12/23/v-rossii-poiaviatsia-bezekipazhnye-suda.html> (дата обращения: 17.05.2021).
 21. Гурлев И.В. Методы и способы обеспечения безопасности информации, передаваемой по спутниковой сети технологии VSAT // *Интернет-журнал «Науковедение»*, 85EVN317. № 3, май-июнь 2017. – 9 с.
 22. Спутниковая связь для Арктики. URL: goarctic.ru/society/sputnikovaya-svyas-dlya-arktiki (дата обращения: 23.04.2021).
 23. Плавающая АЭС вдохнет новую жизнь в развитие Чукотки. URL: tass.ru/ekonomika/6886636 (дата обращения: 24.04.2021).

References

1. Kompleksnoe osvoenie territorii Rossijskoj Federacii na osnove transportnyh prostranstvenno-logicheskikh koridorov. Aktual'nye problemy realizacii megaproekta «Edinaya Evraziya: TEPR – IETS» [Integrated development of the territory of the Russian Federation on the basis of transport spatial and logistics corridors. Actual problems of the implementation of the megaproject "United Eurasia: TEPR-IETS"] / *Otv. red. akademik RAN V.V. Kozlov, chl.-korr. RAN A.A. Makosko; Rossijskaya akademiya nauk. M.: Nauka. 2019. 463 p.*
2. Infrastruktura Sibiri, Dal'nego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i 3 etapa razvitiya do 2050 goda [Infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. State and 3 stages of development until 2050] / *Monografiya pod red. A.A. Makosko. M.: IPT RAN. 2019. 465 p.*
3. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V. Ot Severnogo morskogo puti k Arkticheskomu intellektual'nomu mul'timodal'nomu transportnomu koridoru Rossijskoj Federacii [From the Northern Sea Route to the Arctic Intelligent Multimodal Transport Corridor of the Russian Federation] // *Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2020. Materialy YUbilejnoy mezhdunar. nauchno-prakt. 10-11 noyabrya 2020 g. SPb.: IPT RAN. T. 1. pp. 8-14.*
4. Malygin I.G., Gavkalyuk B.V. Voprosy ustojchivogo funkcionirovaniya transportnogo kompleksa Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii pri chrezvychajnyh situacijah [Issues of sustainable functioning of the transport complex of the Arctic zone of the Russian Federation in emergency situations] // *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Arktika – region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione. Sbornik trudov mezhdunar. nachno-prakt. 28 okt. 2020 g. SPb.: SPbU GPS MCHS Rossii. 2020. pp. 7-9.*

5. Asaul M., Malygin I., Asaul A., Mohov A., Komashinskiy V., Y. Seliverstov. Linking Eurasian Integration with the Silk Road Economic Belt in the context of water transport // *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 131. "New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development" (NSRBCPED 2019). P.237-240. Copyright © 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.
6. Lukin YU.F. Analiz deyatel'nosti Severnogo morskogo puti [Analysis of the activities of the Northern Sea Route] // *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Tom 18. Vypusk № 3. 2015. pp. 467- 475.
7. Severnyj morskoy put'. Itogi 2020 goda. Makety infografiki [The Northern Sea Route. The results of 2020. Infographic Layouts] // ROSATOM. Moskva. 19 yanvarya 2021 goda. 24 p. URL: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf> (data obrashcheniya: 19.04.2021).
8. Mohov I.I., Hon V.CH., Prokofeva M.A. Novye model'nye ocenki izmenenij prodolzhitel'nosti navigacionnogo perioda dlya Severnogo morskogo puti v XXI veke [New model estimates of changes in the duration of the navigation period for the Northern Sea Route in the XXI century] // *Doklady Akademii nauk*. 2016. T. 468. № 6. pp. 699-704.
9. Kibanova O.V., Eliseev A.V., Mohov I.I., Hon V.CH. Izmeneniya prodolzhitel'nosti navigacionnogo perioda Severnogo morskogo puti v XXI veke po raschyotam s ansamblem klimaticheskikh modelej: bajesovskie ocenki [Changes in the duration of the navigation period of the Northern Sea Route in the XXI century according to calculations with an ensemble of climate models: Bayesian estimates] // *Doklady Akademii nauk*. 2018. T. 481. № 1. pp. 88-92.
10. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018 № 204 «O nacional'nyh celyah i strategicheskikh zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda» [«On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024»].
11. Mintrans ozhidaet 900 milliardov rublej investicij v razvitie Sevmorputi [The Ministry of Transport expects 900 billion rubles of investment in the development of the Northern Sea Route]. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/1085> (data obrashcheniya: 27.06.2021).
12. Borduchenko YU.L., Malygin I.G., Kaminsky V.Yu., Aksyonov V.A. Atomnyj ledokol'nyj flot Rossii v pervoj chetverti XXI veka. Zadachi i perspektivy osvoeniya Severnogo morskogo puti [The nuclear icebreaking fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. Tasks and prospects for the development of the Northern Sea Route] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2021. №2-1(52). pp. 14-25.
13. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22.11.2008 № 1734-r «Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda» [«Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030»].
14. Kuvatov V.I., Koz'movskij D.V., SHatalova N.V. Potencial Severnogo morskogo puti Arkticheskoy zony Rossii. Faktory i strategiya razvitiya [The potential of the Northern Sea Route of the Arctic zone of Russia. Factors and development strategy] // *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 20TVN614. № 6 (25), noyabr'-dekabr' 2014. 16 p.
15. Gurlev I.V. Cifrovizaciya ekonomiki Rossii i problemy robotizacii [Digitalization of the Russian economy and the problems of robotization] // *Vestnik Evrazijskoj nauki*, 08ECVN420. № 4 (12), iyul'-avgust 2020. 12 p.
16. Bepilotniki KAMAZ proshli ispytaniya v Arktike [KAMAZ drones have been tested in the Arctic]. URL: https://kamaz.ru/press/releases/bepilotniki_kamaz_proshli_ispytaniya_v_arktike/ (data obrashcheniya: 02.06.2020).
17. Kondrat'ev A.I., Hudyakov O.A., Popov A.N. O neobходимosti vnedreniya bepilotnyh sudov v togovyj flot Rossii [On the need to introduce unmanned vessels into the Russian merchant fleet] // *Transport. TRANSPORT BUSINESS IN RUSSIA*. № 6. 2016. – pp. 138-140.
18. Frolov V.I., Sevbo V.YU., Anufriev I.E. Tekhnologii bezekipazhnogo vozhdeniya [Driverless driving technologies] // *Transport Rossijskoj Federacii*. № 4 (77). 2018. pp. 17-21.
19. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 05.12.2020 № 2031 «O provedenii eksperimenta po opytnoj ekspluatatsii avtonomnyh sudov pod Gosudarstvennym flagom Rossijskoj Federacii» [«On conducting an experiment on the pilot operation of autonomous vessels under the State flag of the Russian Federation»].
20. Gajva E.V. Robota podklyuchat k shturvalu. Rossiya sozdast flot sudov bez ekipazhej [The work will be connected to the steering wheel. Russia will create a fleet of ships without crews]. URL: <https://rg.ru/2020/12/23/v-rossii-poiaviatsia-bezekipazhnye-suda.html> (data obrashcheniya: 17.05.2021).
21. Gurlev I.V. Metody i sposoby obespecheniya bezopasnosti informacii, peredavaemoj po sputnikovoj seti tekhnologii VSAT [Methods and methods of ensuring the security of information transmitted via the VSAT satellite network] // *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 85EVN317. № 3, maj-iyun' 2017. 9 p.
22. Sputnikovaya svyaz' dlya Arktiki [Satellite communications for the Arctic]. URL: goarctic.ru/society/sputnikovaya-svyas-dlya-arktiki (data obrashcheniya: 23.04.2021).
23. Plavuchaya AES vdohnet novuyu zhizn' v razvitie CHukotki [Floating nuclear power plant will breathe new life into the development of Chukotka]. URL: tass.ru/ekonomika/6886636 (data obrashcheniya: 24.04.2021).

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Валентинович Гурлев, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: gurleff@mail.ru

Igor V. Gurlev, professor, Dr. Sci. (Eng), senior researcher, leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: gurleff@mail.ru

Александр Аркадьевич Макоско, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., 3, e-mail: aamacosco@mail.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: malygin_com@mail.ru

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Alexander A. Makosko, professor, Dr.Sci. (Eng), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory, A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russian Federation, e-mail: aamacosco@mail.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), CEO of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: malygin_com@mail.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, PhD(Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.05.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 624.195, 347.791, 614.84

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.027>

О пожароопасности транспортных гидротоннелей

А.А. Таранцев^{1,2}, e-mail: t_54@mail.ru, **А.Н. Борисов**³, e-mail: bor_fond93@mail.ru, **М.С. Галиев**^{1,3}, e-mail: maxgaliev@yahoo.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

²Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России,

³Санкт-Петербургский государственный Морской технический университет

Аннотация. В статье рассмотрена достаточно новая проблема, связанная с появлением и развитием перспективной транспортной инфраструктуры – гидротоннелей. Показано, что ввиду большой пожарной нагрузки, которую представляют собой проходящие по гидротоннелю суда (пассажирские, сухогрузы, контейнеровозы, танкеры) возможно возникновение пожаров, угрожающих как самим судам и их экипажам, так и конструкции гидротоннеля – обрушение его свода из-за экстремальных тепловых нагрузок. Проведено компьютерное моделирование с использованием полевой модели пожара, подтвердившее факт быстрого роста температуры и концентрации токсичных продуктов горения, а также «тоннельный эффект» – прохождение высокотемпературного потока газов к одному из торцов тоннеля. Даны предложения по действиям персонала судов в гидротоннеле и пожарных кораблей по тушению пожара и спасению людей. Показана необходимость оборудования некоторых гидротоннелей дренчерными системами пожаротушения. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований в части пожарной безопасности транспортных гидротоннелей и разработке соответствующего нормативного документа.

Ключевые слова: гидротоннели, суда, пожары, взрывы, спасение, пожарная сигнализация, пожаротушение

About the fire hazard of transport hydrotunnels

Alexander A. Tarantsev^{1,2}, e-mail: t_54@mail.ru, **Alexander N. Borisov**³, e-mail: bor_fond93@mail.ru, **Maxim S. Galiev**^{1,3}, e-mail: maxgaliev@yahoo.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation,

²Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia,

³Saint Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The article considers a fairly new problem associated with the emergence and development of a promising transport infrastructure – hydrotunnels. It is shown that due to the large fire load, which is represented by vessels passing through the hydrotunnel (passenger, dry cargo, container ships, tankers) there may be fires that threaten both the ships themselves and their crews, and the structure of the hydrotunnel – the collapse of its arch due to extreme thermal loads. A computer simulation was carried out using a field model of a fire, which confirmed the fact of a rapid increase in temperature and concentration of toxic combustion products, as well as the "tunnel effect" – the passage of a high-temperature gas flow to one of the ends of the tunnel. Suggestions are given on the actions of the personnel of vessels in the hydrotunnel and fire ships to extinguish the fire and rescue people. The necessity of equipping some hydrotunnels with drencher fire extinguishing systems is shown. The conclusion is made about the need for further research in terms of fire safety of transport hydraulic tunnels and the development of an appropriate regulatory document.

Keywords: hydrotunnels, ships, fires, explosions, rescue, fire alarm, fire fighting

Введение

Развитие инфраструктуры нашей страны является одним из стратегических направлений [1-3]. Важное место в транспортной инфраструктуре РФ и многих других стран занимает морской и речной транспорт, на долю которого приходится значительный объем грузопассажирских перевозок, функционирование которого обеспечивается различными гидротехническими сооружениями [4]. Однако наличие сложной береговой линии заставляет разрабатывать специальные сооружения, позволяющие безопасно и эффективно осуществлять грузопассажирские перевозки,

Одним из примеров таких сооружений является норвежский Морской судоходный тоннель "Stad Ship Tunnel" (рис. 1) [5], ввод в строй которого планируется в 2023 г. Необходимость его строительства вызвана особенностями Норвегии, длина изрезанной береговой линии которой 23 тыс. км, а море штормит 100 дней в году, что создаёт серьёзный риск для

судоходства. В тоже время, тоннель в узкой части полуострова Stad (рис. 1-а) позволяет значительно сократить и обезопасить сообщение между городами Agat и Maloy. Тоннель будет проходить под 300-метровой горой, его строительство обойдётся в \$300.000, продолжительность строительства – до 4 лет. Характеристики тоннеля: длина 1,7 км, высота 37 м, ширина 27 м, пропускная способность 100 судов (осадкой до 12 м) в сутки, режим работы – реверсный: 1 час в одну сторону, другой час – в обратную. Для обеспечения трафика предусмотрен специальный диспетчерский пункт.

Если в настоящее время полуостров Stad обигают 20 судов в сутки, то с вводом тоннеля количество проходящих судов может увеличиться в 5 раз. Успешная реализация данного проекта может дать старт созданию подобных морских и речных тоннелей, которые далее будем именовать *гидротоннелями*.

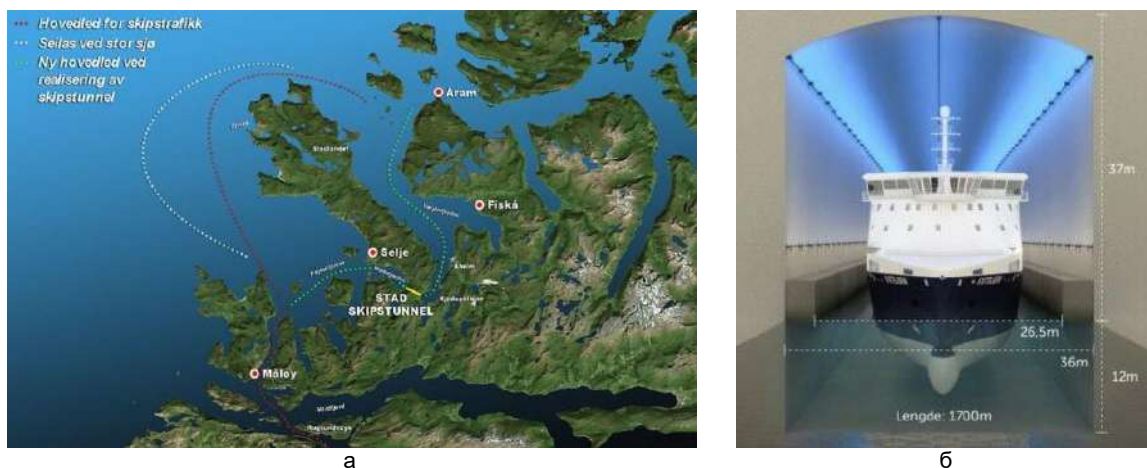


Рис. 1. Норвежский Морской судоходный тоннель “Stad Ship Tunnel” через полуостров Stad (а) и его размеры (б)

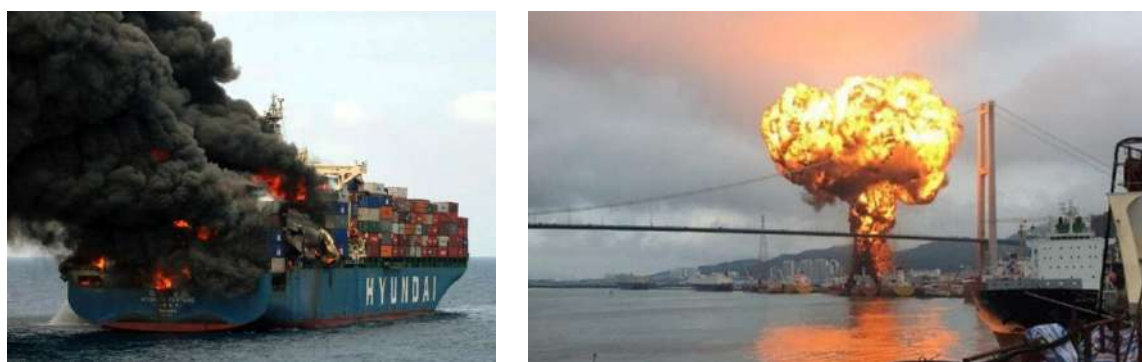


Рис. 2. Пожары судов (а – горение контейнеровоза, б – взрыв танкера)

Особенности пожаров в гидротоннелях

Однако функционирование гидротоннелей связано и с рядом опасностей, основной из которых являются пожары.

Дело в том, что и пассажирские, и грузовые суда (особенно танкеры) обладают высокой пожарной нагрузкой, возгорание которой приводит к выделению большой тепловой мощности (рис. 2-а), а при наличии ЛВЖ/ГЖ и к взрыву (рис. 2-б). Известно, что опасные факторы пожара (ОФП) [6] (пламя, искры, тепловой поток, повышенная температура, пониженная видимость, токсичные продукты горения, пониженная концентрация O₂) в тоннелях возрастают с гораздо большей интенсивностью [7].

Это приводит к тому, что развитие пожара судна в гидротоннеле чревато а) разрушением металлического корпуса с притоплением и/или опрокидыванием судна и последующим блокированием тоннеля; б) риском для жизни и здоровья экипажа судна и его пассажиров; в) переходом пожара на соседние суда в гидротоннеле; г) термическим повреждением конструкции гидротоннеля и обрушением его свода.

Исследования показали, что особую опасность может представлять «тоннельный эффект» - скоростное прохождение высокотемпературного потока продуктов горения к одному из его выходов из-за перепада атмосферного давления на его торцах [8, 9]. Из-за ускоренного выгорания кислорода это угрожает ещё и остановкой двигателей судов в тоннеле, т.е. их обездвижению и невозможности

подачи воды корабельными средствами пожаротушения.

Моделирование развития пожара

Ввиду отсутствия статистических данных о развитии пожаров в гидротоннелях (пока есть только размеры “Stad Ship Tunnel”) представляется целесообразным провести компьютерное моделирование развития ОФП для различных сценариев пожара. Для этого может быть использована полевая модель пожара [10].

Проведённое моделирование на модельном тоннеле позволило установить динамику ОФП (рис.3-5) и наличие «тоннельного эффекта» при горении объекта, соответствующего грузовому судну.

Следует отметить, что при геометрических характеристиках конкретного гидротоннеля и сведения о пожарной нагрузке проходящих по нему судов могут быть получены и конкретные данные о динамике ОФП в различных точках гидротоннеля. Но даже краткий анализ полученных данных (рис.3-5) свидетельствует о значительной опасности пожара в гидротоннеле для находящихся там судов и людей, а также для его конструкции.

Это в свою очередь ставит задачу обеспечения пожарной безопасности гидротоннелей как путём оборудования их системами пожарной сигнализации и пожаротушения, так и посредством тактики тушения и спасения людей.

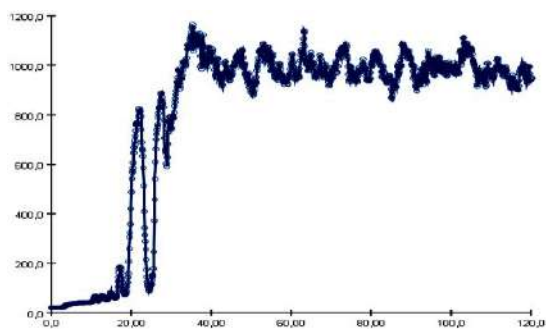


Рис. 3. Динамика температуры (°C) над очагом возгорания при пожаре в гидротоннеле

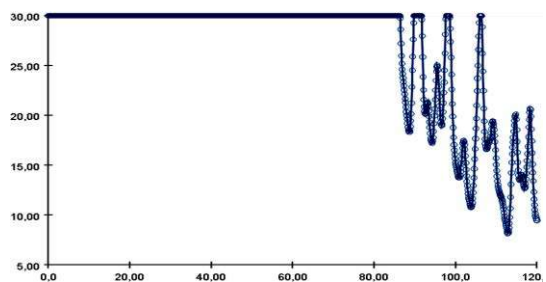


Рис. 4. Динамика ухудшения видимости (м) в условиях задымления при пожаре в гидротоннеле

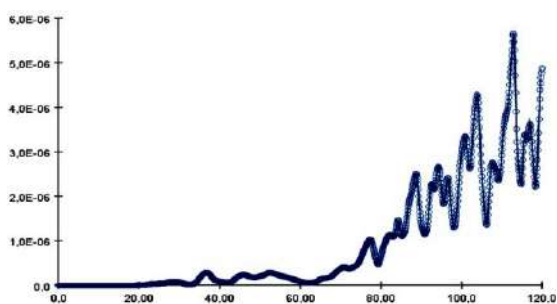


Рис. 5. Динамика увеличения концентрации угарного газа (кг/м³) в районе очага возгорания при пожаре в гидротоннеле

Особенности тушения пожаров в гидротоннелях

К настоящему времени сложилась следующая ситуация. С одной стороны есть документы и опыт тушения пожаров в железнодорожных тоннелях [11-14] и на других объектах, в т.ч. на судах, а также в части проектирования и эксплуатации автоматических установок пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения [15] (АПС и АУП соответственно). С другой стороны – фактическое отсутствие опыта тушения судов в гидротоннелях, но наличие данных об опасности развития там пожаров.

В этой связи, учитывая возможное появление в недалёком будущем подобных гидротехнических сооружений, было бы целесообразным предусмотреть следующее.

1. Поставить НИР, результатом которой была бы разработка рекомендаций по тушению пожаров в гидротоннелях.

2. Сформулировать предложения по снижению рисков при пожарах в гидротоннелях, например:

- ограничить движения по ним танкеров и судов, перевозящих сжиженные газы (пока по гидротоннелю проходит танкер, другие суда находятся снаружи);

- организовать движение судов так, чтобы в гидротоннеле между ними была безопасная дистанция;

- устанавливать в гидротоннеле АПС и дренчерные АУП;

- организовать дежурство пожарных катеров с обоих торцов гидротоннеля;

- рекомендовать развитие и применение безэкипажных судов на маршрутах с наличием гидротоннелей;

- при возникновении пожара в гидротоннеле немедленно выводить оттуда другие суда и (по возможности) горящее судно, тушить которое снаружи;

- предусмотреть технические и организационные меры по обеспечению безопасности экипажей и пассажиров;

- предусмотреть проведение соответствующих пожарно-тактических учений.

Заключение

Таким образом, в работе показана важность транспортных гидротоннелей и особенности их конструкции. С учётом прохождения по ним судов различных классов (пассажирских, грузовых, комбинированных и др.), а также танкеров, существует риск возникновения пожаров. Поскольку проходящие по гидротоннелю суда обладают большой пожарной нагрузкой, возможен быстрый рост опасных факторов пожара и риск «тоннельного эффекта» – прохождения потока высокотемпературных продуктов горения в сторону торца тоннеля с меньшим атмосферным давлением. При нахождении в гидротоннеле нескольких судов возможно как возгорание соседних судов, так и обрушение свода тоннеля из-за высоких температурных нагрузок.

Отдельного исследования требуют вопросы тактики действий пожарных судов по тушению пламени и спасению людей. Особый риск представляют взрывы в гидротоннеле при пожаре на судах, перевозящих нефтепродукты и СПГ.

В этой связи предложено: ограничить прохождение через гидротоннель танкеров и судов, перевозящих взрывчатые вещества и материалы; при проходе судов соблюдать безопасную дистанцию между ними; предусмотреть приоритетное прохождение безэкипажных судов через гидротоннель; оборудовать гидротоннель системами АПС и дренчерными АУП; предусмотреть дежурство или оперативное прибытие пожарных катеров к обоим выходам гидротоннеля; в случае пожара обеспечить экстренный выход судов из тоннеля (по возможности и горящего судна); запланировать периодическое проведение пожарно-тактических учений.

Рассмотрению указанных вопросов должно быть посвящено отдельное исследование, важным результатом которого был бы проект «Рекомендаций по тушению пожаров в гидротоннелях», применение которого обеспечит должный уровень пожаробезопасности и минимальный риск для судов, их экипажей и пассажиров.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года».
3. Asaul M., Malygin I., Asaul A., Mohov A., Komashinskiy V., Y. Seliverstov. Linking Eurasian Integration with the Silk Road Economic Belt in the context of water transport // *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 131. "New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development" (NSRBCPED 2019). P.237-240. Copyright © 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.
4. СНиП 3.07.02-87 Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения.
5. Первый в мире морской тоннель для судов // Международная конференция "Freight.Digital 2021" Sea News. <https://seanews.ru/2020/08/12/ru-pervyj-v-mire-morskoj-tonnel-dlja-sudov/>.
6. Федеральный закон «Технический регламент о требования пожарной безопасности» от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ (с изменениями).
7. Таранцев А.А., Шарапов А.А., Галиев М.С., Химчук Д.В. Особенности пожаров в тоннелях и их тушение // Материалы МНПК «Транспорт России: Проблемы и перспективы». СПб.: ИПТ РАН, СПбУ ГПС МЧС России, 11-12 ноября 2020 г.
8. Fennell, Desmond. Investigation into the King's Cross Underground Fire. — Department of Transport, 1988. — ISBN 0-10-104992-7.
9. Данилов А.И., Сиваков И.А., Пилипенко Н.В., Костерева П.А. Моделирование пожара в двухпутном перегонном тоннеле метро // <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/nauchnye-stati/pozhar-dvukhputnyj-tonnel/>.
10. С.В.Пузач. Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005 – 336 с.
11. Рекомендации по тушению пожаров в железнодорожных тоннелях. Утв. УВО МПС 26.10 1994 г. № ЦУОП-1/73.
12. Рекомендации по тушению пожаров на железнодорожном транспорте. СПб.: ИПТ РАН, 2018 г. - 218 с.
13. Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения АСР. Утв. приказом МЧС от 16.10.2017 г. № 444, зарегистрирован в Минюсте РФ 20.02.2018 г., рег. № 50100.
14. В.М.Кимстач, П.П.Девлишев, Н.М.Евтюшкин. Пожарная тактика. Учебное пособие. М.: Стройиздат, 1984. – 590 с.
15. СП 5.13130.2013 СППЗ. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
16. А.И.Кондратьев, О.А.Худяков, А.Н. Попов. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России // Транспорт. TRANSPORT BUSINESS IN RUSSIA. № 6. 2016. – С. 138-140.
17. В.И.Фролов, В.Ю Севбо, И.Е. Ануфриев. Технологии безэкипажного вождения // Транспорт Российской Федерации. № 4 (77). 2018. – С. 17-21.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018 № 204 «O nacional'nyh celyah i strategicheskikh zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda» [«On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024»].
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22.11.2008 № 1734-r «Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda» [«Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030»].
3. Asaul M., Malygin I., Asaul A., Mohov A., Komashinskiy V., Y. Seliverstov. Linking Eurasian Integration with the Silk Road Economic Belt in the context of water transport // *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 131. "New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development" (NSRBCPED 2019). P.237-240. Copyright © 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.
4. SNiP 3.07.02-87 Gidrotexnicheskie morskije i rechny'e transportny'e sooruzheniya [SNiP 3.07.02-87 Hydraulic marine and river transport structures].
5. Pervyj v mire morskoy tonnel' dlya sudov // Mezhdunarodnaya konferenciya "Freight.Digital 2021" Sea News [The world's first sea tunnel for ships // International conference "Freight. Digital 2021 " Sea News]. <https://seanews.ru/2020/08/12/ru-pervyj-v-mire-morskoj-tonnel-dlja-sudov/>
6. Federal'nyj zakon «Texnicheskij reglament o trebovaniya požarnoj bezopasnosti» ot 22.07.2008 g. № 123-FZ (s izmeneniyami) [Federal Law "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" dated 22.07.2008 No. 123-FZ (as amended)].
7. Tarancev A.A., Sharapov A.A., Galiev M.S., Ximchuk D.V. Osobennosti požarov v tonnyax i ix tushenie // Materialy` MNPK «Transport Rossii: Problemy` i perspektivy`». SPb.: IPT RAN, SPbU GPS MChS Rossii, 11-12 noyabrya 2020 g [Tarantsev A. A., Sharapov A. A., Galiev M. S., Himchuk D. V. Features of fires in tunnels and their extinguishing // Materials of the MNPK "Transport of Russia: Problems and prospects". St. Petersburg: IPT RAS, SPbU GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, November 11-12, 2020].
8. Fennell, Desmond. Investigation into the King's Cross Underground Fire. — Department of Transport, 1988. — ISBN 0-10-104992-7.

9. Danilov A.I., Sivakov I.A., Pilipenko N.V., Kostereva P.A. Modelirovanie pozhara v dvuxputnom peregonnom tonnele metro [Danilov A. I., Sivakov I. A., Pilipenko N. V., Kostereva P. A. Modeling of a fire in a two-track metro stage tunnel] // <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/nauchnye-stati/pozhar-dvukhputnyj-tonnel/>.
10. S.V.Puzach. Metody` raschyota teplomassoobmena pri pozhare v pomeshhenii i ix primenenie pri reshenii prakticheskix zadach pozharovzry`vobezopasnosti. Monografiya. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2005 – 336 s [S. V. Puzach. Methods for calculating heat and mass transfer in case of a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety. Monograph. Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005-336 p.].
11. Rekomendacii po tusheniyu pozharov v zheleznodorozhny`x tonnelyax. Utv. UVO MPS 26.10 1994 g. № CzUOP-1/73 [Recommendations for extinguishing fires in railway tunnels. Approved by the Ministry of Internal Affairs of the Ministry of Internal Affairs on 26.10 1994 No. TSUOP-1/73.].
12. Rekomendacii po tusheniyu pozharov na zheleznodorozhnom transporte. SPb.: IPT RAN, 2018 g. - 218 s [Recommendations for extinguishing fires on railway transport. St. Petersburg: IPT RAS, 2018 - 218 p.].
13. Boevoj ustav podrazdelenij pozharnoj ohrany`, opredelyayushhij poryadok organizacii tusheniya pozharov i provedeniya ASR. Utv. prikazom MChS ot 16.10.2017 g. № 444, zaregistririvan v Minyuste RF 20.02.2018 g., reg. № 5010 [The combat charter of fire protection units, which defines the procedure for organizing fire extinguishing and conducting ASR. Approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of 16.10.2017 No. 444, was registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on 20.02.2018, reg. No. 50100.].
14. V.M.Kimstach, P.P.Devlishev, N.M.Evtyushkin. Pozharnaya taktika. Uchebnoe posobie. M.: Strojizdat, 1984. – 590 s [V. M. Kimstach, P. P. Devlishev, N. M. Yevtyushkin. Fire tactics. Textbook. Moscow: Stroyizdat, 1984 – - 590 p.].
15. SP 5.13130.2013 SPPZ. Ustanovki pozharnoj signalizacii i pozharotusheniya avtomaticheskie. Normy` i pravila proektirovaniya [SP 5.13130.2013 SPP. Fire alarm and fire extinguishing systems are automatic. Norms and rules of design].
16. Kondrat'ev A.I., Hudyakov O.A., Popov A.N. O neobходимosti vnedreniya bespilotnyh sudov v torgovyj flot Rossii [On the need to introduce unmanned vessels into the Russian merchant fleet] // Transport. TRANSPORT BUSINESS IN RUSSIA. № 6. 2016. – pp. 138-140.
17. Frolov V.I., Sevbo V.YU., Anufriev I.E. Tekhnologii bezekipazhnogo vozhdeniya [Driverless driving technologies] // Transport Rossijskoj Federacii. № 4 (77). 2018. pp. 17-21.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: t__54@mail.ru

Alexander A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t__54@mail.ru

Александр Николаевич Борисов, старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного Морского технического университета, 190121, Санкт-Петербург, ул.Лощманская, д.3, e-mail: bor_fond93@mail.ru

Alexander N. Borisov, senior lecturer of the Saint Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str. 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: bor_fond93@mail.ru

Максим Сергеевич Галиев, младший научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; магистрант Санкт-Петербургского государственного Морского технического университета, 190121, Санкт-Петербург, ул.Лощманская, д.3, e-mail: maxgaliev@yahoo.ru

Maxim S. Galiev, junior researcher of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; master's student of the Saint Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str. 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: maxgaliev@yahoo.ru

Поступила в редакцию: 18.06.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 517.977.1/5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.028>

Оценка уровня готовности морских специалистов к действиям в экстремальных условиях

В.И. Чугунов¹, e-mail: chugunovi@rambler.ru¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Аннотация. Общепринятые методы оценки уровня подготовленности специалистов различных профилей имеют в своей основе экспертный подход. При этом, каждый эксперт (преподаватель) оценивает специалиста (обучаемого) по своей шкале, основанной на личных знаниях и опыте. Такой подход во многих сферах профессиональной деятельности незаменим, поскольку другого инструмента оценки специалиста не создано. Тестовая оценка знаний также имеет право на существование, но она наиболее применима там, где нужны знания числовых значений или точных формулировок. Для оценки творческого подхода, креативности такой метод неприменим. Возникает вопрос увязки массива разрозненных оценок (баллов) для определения общего уровня подготовки. Особенно остро этот вопрос возникает при оценке уровня готовности морских специалистов к действиям в экстремальных условиях. Для этого метод выведения среднего балла аттестата (диплома) не годится, так как не всякие знания и профессиональные навыки нужны в экстремальных условиях. К тому же при существующих методах оценки готовности специалиста к профессиональной деятельности его психофизиологические и физические качества, как правило, не учитываются. Рассмотрен логико-математический подход к оценке уровня подготовленности специалистов к действиям в экстремальных условиях. В основу положен закон пропорциональности потоков выполняемых работ и ресурсов, которые определяются целевыми функциями и объективными законами функционирования и развития системы «Человек – техника – среда».

Ключевые слова: система, человек, техника, среда, логико-математическая теория, диагностическая карта, показатель, индекс, эффективность.

Assessing the level of readiness of marine specialists to act in extreme conditions

Valery I. Chugunov¹, e-mail: chugunovi@rambler.ru¹Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Generally accepted methods of assessing the level of preparedness of specialists of different profiles have a basic expert approach. At the same time, each expert (teacher) evaluates the specialist (training) on his scale, based on personal knowledge and experience. This approach is indispensable in many areas of professional activity, as no other tool for assessing a specialist has been created. Test assessment of knowledge also has the right to exist, but it is most applicable where knowledge of numerical values or precise formulations is needed. To evaluate creativity, creativity, this method is not applicable. The question arises of linking an array of disparate scores (points) to determine the overall level of training. This issue is particularly acute when assessing the level of readiness of marine specialists to act in extreme conditions. To do this, the method of deducing the average score of the certificate (diploma) is not suitable, as not all knowledge and professional skills are needed in extreme conditions. In addition, in the existing methods of assessing the readiness of a specialist for professional activities, his psychophysiological and physical qualities are usually not taken into account. The logical and mathematical approach to assessing the level of preparedness of specialists to action in extreme conditions is considered. The law of proportionality of the flow of work and resources, which are determined by the targeted functions and objective laws of operation and development of the system «Man - technology – environment» is the basis.

Keywords: system, man, technology, environment, logical-mathematical theory, diagnostic map, indicator, index, efficiency

Введение

Морские специалисты выполняют свою работу в условиях природной среды не соответствующей условиям жизнедеятельности сухопутного специалиста. Тем самым выдвигаются специфические требования к психологическим, физиологическим и физическим качествам морского специалиста. Условия и вид деятельности определяют необходимые знания и профессиональные навыки, их объём и уровень. Система подготовки морского специалиста к его профессиональной деятельности структурируется в соответствии с предстоящей деятельностью, но и включает ряд общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин. Но не все знания имеют одинаково полезное значение. Это особенно проявляется в экстремальных условиях.

Неверные методы подготовки и неадекватные методы оценки подготовленности иногда вызывают дистресс, когда специалист попадает в экстремальные условия. К примеру, когда при подготовке моряка к действиям в условиях выживания ему читается теория и показываются учебные фильмы, а тренировки в реальных условиях не проводятся, тогда при кораблекрушении он сразу обнаруживает, что ничего делать не умеет, как вести себя не знает. Возникший дистресс приводит или к ступору (тихая паника), или к хаотическим действиям (бурная паника). Психофизиологическая готовность к действиям в экстремальных условиях вырабатывается только в натуральных тренировках с последующим разбором действий и допущенных ошибок. Только так вырабатывается правильный стереотип поведения. Следовательно, система оценки уровня готовности моряка к действиям в

экстремальных условиях строится на комплексной оценке теоретических знаний, профессиональных навыков и психологической готовности к действиям.

Общепринятые методы оценки уровня подготовленности специалистов различных профилей имеют в своей основе экспертный подход. При этом, каждый эксперт (преподаватель) оценивает специалиста (обучаемого) по своей шкале, основанной на личных знаниях и опыте. Такой подход во многих сферах профессиональной деятельности незаменим, поскольку другого инструмента оценки специалиста не создано. Экспертные оценки обязательно включаются в общую систему оценки готовности морского специалиста по критериям теоретических знаний и профессиональных навыков. Тестовая оценка знаний также имеет право на существование, но она наиболее применима там, где нужны знания числовых значений или точных формулировок. Для оценки творческого подхода, креативности такой метод неприменим. Оценка психофизиологического состояния моряка производится с применением психологических тестов, инструментального измерения физиологических показателей. Для оценки взаимодействия в подразделении, экипаже применяются социометрические тесты и экспертные оценки. Возникает вопрос увязки массива разрозненных оценок (баллов) для определения общего уровня подготовки. Особенно остро этот вопрос возникает при оценке уровня готовности морских специалистов к действиям в экстремальных условиях. Для этого метод выведения среднего балла аттестата (диплома) не годится, так как не всякие знания и профессиональные навыки нужны в экстремальных условиях. К тому же при существующих методах оценки готовности специалиста к профессиональной деятельности его психофизиологические и физические качества, как правило, не учитываются.

Объективная оценка уровня подготовленности специалиста к действиям в экстремальных условиях предполагает минимизацию субъективного подхода на основе точного моделирования условий деятельности, структурирования задач, предстоящих для выполнения специалистом, и адекватного построения системы критериев, показателей и нормативов. Традиционно нормативы регламентируются в нормативных правовых актах [1, 2]. Применение вычислительной техники [3, 4] позволяет облегчить обработку массива данных, но всё же для определения уровня подготовленности (вероятности успешной деятельности) в ЭВМ необходимо заложить адекватную математическую модель. Применение логико-математической теории систем с соблюдением закона пропорциональности распределения работ и ресурсов позволяет произвести более точную оценку специалиста.

Закон пропорциональности распределения работ и ресурсов является объективным универсальным законом природы. Для выполнения какого-либо действия или изготовления объекта необходимы соответствующие ресурсы времени, энергии и средств. Коэффициент эффективности (полезного действия) равен 1 когда фактические затраты ресурсов равны потребным.

Специалисты, работающие в экстремальных условиях (военные, спасатели, экипажи воздушных и

морских судов), располагают ограниченными ресурсами для выполнения своих функций, в частности, по обеспечению выживания (спасания) людей.

В экстремальных условиях в системе «Человек – техника – среда» действуют как поражающие факторы, так и способствующие выживанию. Одним факторам специалисты должны противостоять, другие использовать, выполняя вполне определенные работы. Для этого необходимо иметь соответствующий объем знаний, профессиональных навыков, физическую и психологическую готовность к действиям.

1. Структурирование деятельности специалиста

Структурирование деятельности специалиста (группы людей, экипажа) строится по временной шкале (по этапам), выполняемым задачам и действиям, применяемым знаниям и навыкам с моделированием последовательности изменения состояния системы под воздействием факторов внутрисистемных (причин) и внесистемных (условий). Социотехническая система состоит из трёх подсистем: человек, техника, среда.

«Человек – техника – среда» – это многоуровневая система образованная единством и взаимодействием подсистем (звеньев) разной природы и назначения. В системе между звеньями образуются потоки, которые определяются целевыми функциями и объективными законами её функционирования и развития. Они проявляются в действиях специалистов направленных на выполнение предстоящих задач. Для составления диагностической карты оценки уровня подготовленности специалистов определяются и измеряются потоки (материальные, энергетические и информационные) взаимосвязи между звеньями системы. Сопоставляются потоки работ и ресурсов.

Любой параметр потока может находиться в соответствии с границами заданного диапазона (норма), ниже нормы, выше нормы. При прохождении через элемент системы значение параметра $X_{вх}$ может уменьшаться или увеличиваться $X_{вых}$, в зависимости от внутренней функции F_x элемента (рисунок 1а). Разделение потоков в элементе показано на рис. 1б.

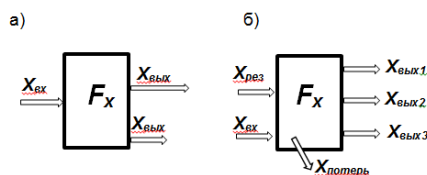


Рис. 1 Разделение потоков в элементе.

$X_{вх}$ - входной поток; $X_{вых1}$, $X_{вых2}$, $X_{вых3}$ - выходные потоки; $X_{рез}$ - резервы (неприкосновенный запас), $X_{потерь}$ - потери ресурсов и резервов (материальных, временных, энергетических, информационных).

При разделении потоков для нормального функционирования звена должно соблюдаться условие: $X_{вх} + X_{рез} \geq X_{вых1} + X_{вых2} + X_{вых3} + X_{потерь}$.

При построении математической модели функционирования системы на первый план выходит раскрытие форм математической записи операторов F_x , отображающих происходящие рабочие процессы

переработки информации, использования ресурсов, в физических и психофизиологических параметрах специалистов и отражения их во временных параметрах.

Действия специалистов (экипажей) во времени разделяется на этапы. В общем плане выделяется три этапа:

- ДО возникновения экстремальной ситуации (повседневная работа),
- ВО ВРЕМЯ происшествия (организация и осуществление необходимых действий),
- ПОСЛЕ завершения экстремальной ситуации.

На каждом этапе решаются определенные задачи. Детализация задач по упражнениям (операциям) производится исходя из конкретных условий деятельности, располагаемых ресурсов (РС), технических средств и состава экипажей.

Соотношение фактически выполненного объема работ (ФР) к плановому (ПР) в сложившейся ситуации служит показателем эффективности работы подразделения и является апостериорным показателем. Соотношение показателей, характеризующих реальные (определенные при тестировании) возможности элементов системы по выполнению плановой работы являются априорными показателями уровня подготовленности специалистов к выполнению своих функций. Закон пропорциональности упрощенно можно представить в виде схемы (рис. 2).

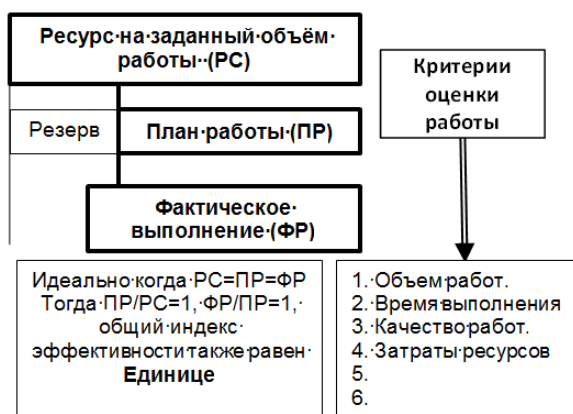


Рис. 2 - Схема пропорциональности объема работ и выделенных ресурсов

2. Построение диагностической карты оценки уровня подготовленности специалистов

Для оценки уровня подготовки строится система показателей по группам критериев и видам деятельности. На каждый показатель устанавливается норматив по верхнему или нижнему пределу параметра. Фактическое значение показателя в сравнении с нормативом дает значение частного показателя. Затем определяются общие показатели по задачам и этапам технологического процесса. В конечном счете, определяется общий индекс готовности специалиста (подразделения) к действиям по своему функциональному назначению в заданных условиях в безразмерной величине (от 0 до 1)

Схематически их взаимосвязь можно изобразить линейной цепью (рис. 3), но в реальности они отражают функциональную структуру системы.

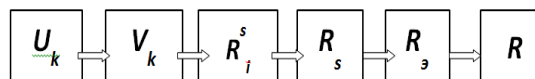


Рис. 3 - Линейная цепь взаимосвязи показателей деятельности

$U_k(t)$ – напряженность по частному параметру;
 $V_k(t)$ – группа частных показателей: один показатель на один измеряемый параметр;

$R_i^s(t)$ – группа общих показателей: общий показатель обобщает группу частных показателей, объединяемых по характерному признаку;

R_s – группа общих показателей по решению определенной задачи;

$R_э$ – группа общих показателей по выполнению задач на определенном направлении деятельности или этапу;

R – общий показатель (индекс) оценки деятельности анализируемой системы (специалиста, подразделения) в целом.

Исходным является значение напряженности выполнения норматива $U_k(t)$

Напряженность безразмерная величина. Это позволяет математически обрабатывать показатели параметров, имеющих различную природу и размерность.

Точность определения напряженности звена по выполнению норматива зависит от реальности установления последнего. Это имеет существенное значение.

К примеру, для определения уровня физической подготовки [1, 2] используется показатель время забега на дистанцию (100 или 1000 м). Может ли такой показатель использоваться для присвоения классности специалисту? В морском флоте есть члены экипажей морских и воздушных судов и морские пехотинцы. Для кого из них умение быстро и долго бегать является определяющим параметром при исполнении своих профессиональных обязанностей? Для морской пехоты – да, для экипажа морского судна – возможно, для экипажа ВС – однозначно нет (в полёте никто не бегает). Однако известны случаи, когда лётчика понижали в классе, если он не уложился в норматив по бегу!

Норматив может устанавливаться эмпирическим путем или на основе объективных параметров процесса. Он может устанавливаться с верхним пределом (объем работы) или с нижним (время выполнения). При пересечении фактическим значением параметра установленного предела его значение будет больше 1. Значительное превышение свидетельствует об установлении заниженного значения норматива или показатель, по которому устанавливается норматив, не является определяющим (существенным).

Норматив по времени выполнения действия устанавливается на основании статистики выполнения этого действия опытными специалистами (инструкторами): среднее время выполнения действия плюс среднеквадратическое отклонение. Норматив времени на выполнение действий в ряде случаев диктуется временем течения какого-либо значимого процесса.

Работа звена должна оцениваться: с позиции звена; с позиции системы; с позиции согласования

интересов звена и системы. Соответственно вводятся три вида частных показателей.

Степень напряженности выполнения норматива:

а) при верхнем нормируемом пределе:

$$U_k(t) = \frac{i_k(t)}{g_k(t)} \quad (1)$$

б) при нижнем нормируемом пределе:

$$U_k(t) = \frac{g_k(t)}{i_k(t)} \quad (2)$$

где $i_k(t)$ – фактическое значение параметра, $g_k(t)$ – нормируемое значение параметра.

Частные показатели запишутся:

- с позиции системы

$$V_k(t) = U_k^2(t) \quad (3)$$

- с позиции звена:

а) при верхнем нормируемом пределе:

$$P_k^*(t) = g_k(t) + m \frac{[g_k(t) - i_k(t)]^2}{g_k(t)} \quad (4)$$

б) при нижнем нормируемом пределе:

$$P_k^*(t) = g_k(t) + m \frac{[g_k(t) - i_k(t)]^2}{i_k(t)} \quad (5)$$

где $P_k^*(t)$ – частный показатель в приведенных единицах;

$m = 1$, если $U_k(t) \geq 1$

$m = -1$, если $U_k(t) < 1$

С учетом (1) и (2), $V_k^*(t)$ – частный показатель в относительных единицах равен:

$$\text{при верхнем пределе: } V_k^* = \frac{P_k^*(t)}{g_k(t)} \quad (6)$$

$$\text{при нижнем пределе: } V_k^* = \frac{P_k^*(t)}{i_k(t)} \quad (7)$$

- с позиции согласования интересов системы и звена:

$$V_k^{**}(t) = \frac{2V_k(t)V_k^*(t)}{V_k(t) + V_k^*(t)} \quad (8)$$

Общие показатели деятельности вычисляются в порядке их укрупнения в соответствии со структурой системы и имеют одинаковый вид:

$$R_i^s = \frac{n_i \prod_{j=1}^{n_i} V_{ij}^s}{\sum_{k=1}^{n_i} \prod_{j=1, j \neq k}^{n_i-1} V_{ij}^s}, \quad (9)$$

где - R_i^s – значение общего показателя подготовки члена экипажа по i -ой группе показателей;

- n_i – количество частных показателей в i -ой группе;

- $V_{ij}(t)$ – частный j -й показатель в i -й группе.

В последующих формулах общий показатель более низкого уровня в формуле определения общего показателя более высокого уровня занимает место частного показателя.

Общий индекс эффективности характеризует уровень готовности (подготовленности, эффективности) и измеряется в относительных единицах от 0 до 1.

Человек, как элемент системы управления (объект обучения) имеет пять основных входных каналов (зрение, слух, тактильные ощущения, обоняние, вкус) и два выходных канала: вербальный и моторный (рисунок 4). Преобразование, кодирование, запоминание, распознавание образов, синтез и принятие решения и его реализация – есть его внутренняя функция f_x , которая проявляется через психофизиологическое напряжение.

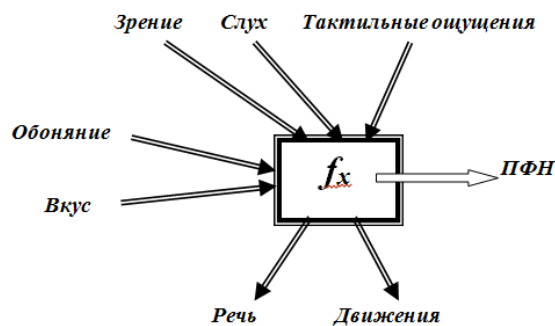


Рис. 4 - Человек, как элемент системы управления (объект обучения)

Выходные каналы определяют критерии оценки уровня подготовки: теоретические знания (вербальный канал), профессиональный навык (моторный канал), физическая подготовка и психологическая готовность к действиям (психофизиологическое напряжение).

Критериями оценки уровня теоретической подготовленности принимаются:

- знание объема информации,
- умение принимать правильное решение в заданных условиях или выбора оптимального варианта из нескольких возможных,
- умение производить безошибочно расчеты,
- количество и тяжесть допускаемых ошибок.

Критериями оценки уровня профессиональных навыков являются:

- время выполнения отдельных операций и задания в целом;
- качество и последовательность выполнения упражнения;
- количество и тяжесть допущенных ошибок.

Качество выполнения упражнения, как правило, оценивается экспертно в баллах. Время выполнения по сравнению с качеством играет второстепенную роль. Поэтому, некоторые операции (упражнения) по времени могут не оцениваться. С другой стороны, наличие ошибки, ведущей к травмированию или другому опасному явлению, влечет за собой оценку 0,001 (чтобы исключить в формулах деление на ноль).

При применении логико-математического подхода к оценке уровня подготовленности индексы принимают значение от 0 до 1.

Нижний предел (ноль) – такой уровень подготовленности, когда время выполнения нормативов значительно превышает допустимые значения, или когда психологическое состояние не совместимо с осознанной деятельностью (паника, апатия, неадекватные действия), отсутствуют элементарные знания и навыки, необходимые в работе.

Верхний предел (единица) – такой уровень подготовленности, когда имеющиеся знания позволяют выполнять работу в ожидаемых условиях, операции выполняются безошибочно за время, не превышающее нормативное, поведение адекватно обстановке, наблюдается высокий уровень активности, самоконтроля, низкий уровень тревоги и страха.

Заключение

Объективная оценка уровня готовности морского специалиста к действиям в экстремальных условиях требует системного анализа трёх сред, в которых он осуществляет свою деятельность: социальной, технической и природной. Человек сам является составляющей социальной и природной сред. Элементы технической среды человек использует в своей деятельности. Важно при оценке действий человека учитывать цель системы. При этом цель системы и человека, функционирующего в этой системе, могут не совпадать. К примеру, если цель индивида разрушить систему, то его действия, направленные во вред системе, с точки зрения индивида – правильные, а с точки зрения системы – не правильные. Таким образом, структурирование системы оценки уровня подготовленности морского специалиста должно исходить из анализа его целевых функций. Применительно к деятельности морского специалиста в экстремальных условиях, в качестве целевых функций можно выделить: борьбу за живучесть корабля (судна) при пожаре, получении пробоины, огневого воздействия врага; обеспечение выживания команды и пассажиров в аварийных и катастрофических ситуациях, как на борту корабля (судна), так и после его покидания (в автономных условиях существования).

Для выполнения своих целевых функций моряк использует технической оборудование судна (бортовое аварийно-спасательное оборудование (БАСО)), а в автономных условиях природной среды, ресурсы этой среды. Он обязан противодействовать поражающим факторам и использовать факторы, способствующие выживанию. Поэтому, на разных флотах задачи, упражнения по действиям в экстремальных условиях имеют отличия. Соответственно, будут отличаться параметры и показатели подготовленности. Такой же подход по формированию структуры диагностической карты сохраняется при различии типа корабля (судна) и его оборудования.

Когда морской специалист рассматривается в составе экипажа, тогда перечень параметров оценки дополняется социометрическими показателями, технологическими картами взаимодействия и распределения обязанностей. Карта индивида содержит его антропологические параметры и личностные. Часть из них проявляется при выполнении всех задач, а часть – только при выполнении отдельных задач и упражнений.

Формирование диагностической карты происходит выделением трёх временных отрезков:

- до возникновения экстремальной ситуации (подготовка БАСО, экипажа и пассажиров к выходу в море);

- во время экстремальной ситуации (оповещение, приведение в действие БАСО, тушение пожара, борьба за живучесть судна, эвакуация с судна, выживание в экстремальных условиях);

- после экстремальной ситуации (ликвидация последствий, восстановление нормальной работы, эвакуация пострадавших).

На каждом временном отрезке (этапе), в зависимости от сложности системы, последовательно выделяются подэтапы, задачи и упражнения. По каждой задаче и упражнению неизменно присутствуют три группы критериев оценки: теоретические знания, профессиональные навыки и психологическая готовность к действиям. Критерии содержат параметры, показатели по которым оцениваются на соответствие нормативам по формулам (1-9). Получаемые в ходе обработки массива данных частные и общие показатели позволяют определять слабые и сильные стороны морского специалиста, оценить уровень его надёжного функционирования в ожидаемых экстремальных условиях.

Приведенный математический аппарат применим для оценки уровня подготовки различных специалистов, а также экипажей и подразделений. Впервые он успешно использован при подготовке экипажей воздушных судов, затем применён при оценке эффективности деятельности пожарно-спасательных подразделений МЧС России [6].

Литература

1. Об утверждении Наставления по физической подготовке в Вооружённых силах Российской Федерации: приказ министра обороны РФ от 21.04.2009 г. № 200. М.: 2009
2. Нормативы по пожарно-строевой и тактико-специальной подготовке для личного состава федеральной противопожарной службы утверждённые Главным военным экспертом МЧС России П.В. Плат 10.05.2011 г.
3. Гарнагин Ю.С. Методика автоматизированной оценки уровня подготовки специалистов морского флота.// Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск: 2017, № 2 (19). С. 60-63
4. Борисов В.Е., Степанов С.М., Торосян А.А. Математическое моделирование системы автоматизированной оценки уровня подготовки авиадиспетчеров.// Научный вестник УИ ГА. Ульяновск: 2017. № 9. С. 137-140
5. Чугунов В.И. Применение теории надёжности для определения значений ограничений для маломерных судов.// Материалы IX Международного форума «Водный туризм». 7-8 сентября 2017 г. Санкт-Петербург с. 30-33
6. Отчёт о НИР. Изучение эффективности деятельности пожарно-спасательных подразделений МЧС России в рамках проведения расширенного организационно-технического эксперимента по отработке технологии экстренного реагирования на пожары и чрезвычайные ситуации. № ГР 01201272220, Инв. № 02201350899
7. Чугунов В.И. Системный подход к оценке уровня готовности подразделений пожарной охраны.// Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). СПб университет ГПС МЧС России. СПб.: 2021. № 1 (37). С. 9-18

References

1. Ob utverzhenii Nastavleniya po fizicheskoy podgotovke v Vooruzhennykh silakh Rossiyskoy Federatsii [On the approval of the Physical Training Guidance in the Armed Forces of the Russian Federation]: prikaz ministra obrony RF ot 21.04.2009 g. № 200. M.: 2009
2. Normativy po pozharo-stroyevoy i taktiko-spetsial'noy podgotovke dlya lichnogo sostava federal'noy protivopozharnoy sluzhby utverzhennyye Glavnym voyennym ekspertom MCHS Rossii [Regulations on fire-fighting and tactical-special training for the personnel of the Federal Fire Service approved by the Chief Military Expert of the Ministry of Emergency Situations of Russia] P.V. Plat 10.05.2011 g.
3. Garnagin YU.S. Metodika avtomatizirovannoy otsenki urovnya podgotovki spetsialistov morskogo flota [A methodology for automated assessment of the level of training of seafarer] // Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova. Novorossiysk: 2017, № 2 (19). S. 60-63
4. Borisov V.Ye., Stepanov S.M., Torosyan A.A. Matematicheskoye modelirovaniye sistemy avtomatizirovannoy otsenki urovnya podgotovki aviadispatcherov [Mathematical modeling of the automated evaluation system of simulating training of air traffic controllers] // Nauchnyy vestnik UI GA. Ul'yanovsk: 2017. № 9. S. 137-140
5. Chugunov V.I. Primeneniye teorii nadezhnosti dlya opredeleniya znacheniy ogranicheniy dlya malomernykh sudov [Applying reliability theory to determine limits for small vessels]// Materialy IX Mezhdunarodnogo foruma «Vodnyy turizm». 7-8 sentyabrya 2017 g. Sankt-Peterburg s. 30-33
6. Otchet o NIR. Izucheniye effektivnosti deyatel'nosti pozharo-spatatel'nykh podrazdeleniy MCHS Rossii v ramkakh provedeniya rasshirenogo organizatsionno-tekhnicheskogo eksperimeta po otrabotke tekhnologii ekstrennogo reagirovaniya na pozhary i chrezvychaynyye situatsii Studying the effectiveness of fire and rescue units of the Ministry of Emergency Situations of Russia as part of an expanded organizational and technical experiment to develop the technology of emergency response to fires and emergencies [№ GR 01201272220, Inv. № 02201350899
7. Chugunov V.I. Sistemnyy podkhod k otsenke urovnya gotovnosti podrazdeleniy pozharnoy okhrany.// Prirodnyye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty) [A systematic approach to assessing the level of readiness of fire departments.// Natural and man-made risks] SPb universitet GPS MCHS Rossii. SPb.: 2021. № 1 (37). S. 9-18

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Валерий Иванович Чугунов – канд. техн. наук, доцент; Московский проспект, 149, Санкт-Петербург, Россия, 196105. Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России; e-mail: chugunovi@rambler.ru

Valerii I. Chugunov - senior lecturer, Ph.D. (Eng), Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia; 149, Moskovsky prospect, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: chugunovi@rambler.ru

Поступила в редакцию: 18.06.2021

Принята к публикации: 12.08.2021

Формирование новой экосистемы рыбохозяйственного комплекса России в современных условиях

Н.А. Кострикова¹, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru, А.Я. Яфасов¹, e-mail: yafasov@list.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В последние годы в России перестал расти объем добычи водных биоресурсов, слабо развиваются частное предпринимательство и процессы цифровой трансформации в РХК. Пандемия COVID-19 ускорила необходимость использования цифрового экосистемного подхода в организации деятельности РХК. Предлагается проводить цифровую трансформацию РХК конгруэнтно с созданием новых технологий глубокой переработки водных биоресурсов и развитием рециклинга. Процесс технологической модернизации РХК необходимо выстраивать с учетом ранжированной системы ценностей: Человек – Общество – Природа – Технологии – Экономика. Он отличается человекоцентричностью создаваемой цифровой экосистемы РХК и способен дать синергетический эффект. Представлен алгоритм жизненного цикла новой продукции в контексте государственно-частного партнерства. Предлагаемый подход позволит повысить производство Hi – Tech продукции с обеспечением устойчивого развития РХК и экономики приморских регионов России.

Ключевые слова: человек, общество, природа, НИОКР, цифровизация, алгоритм, экосистема.

The formation of a new ecosystem of the fishery industry of Russia in modern conditions

Natalia A. Kostrikova¹, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru, Abdurashid Y. Yafasov¹ e-mail: yafasov@list.ru

¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In recent years, the volume of the extraction of aquatic biological resources in Russia has ceased to grow, private entrepreneurship and digital transformation processes in the fishery industry are underdeveloped. The COVID-19 pandemic has accelerated the need to use a digital ecosystem approach in organizing the activities of the fishery industry. It is proposed to carry out the digital transformation of the fishery industry congruently with the creation of the new technologies for deep processing of aquatic biological resources and the development of recycling. The process of technological modernization of the fishery industry should be built taking into account the ranked system of values: Man - Society - Nature - Technology - Economy. It is distinguished by the human-centricity of the created digital ecosystem of the fishery industry and is able to give a synergistic effect. The algorithm of the lifecycle of new products in the context of public-private partnership is presented. The proposed approach will increase the production of Hi-Tech products with ensuring the sustainable development of the fishery industry and the economy of the coastal regions of Russia.

Key words: people, society, nature, R&D, digitalization, algorithm, ecosystem.

Введение

Рыбохозяйственный комплекс является одним из 3-х ключевых опор продовольственной безопасности России наряду с сельским хозяйством и пищевой промышленностью. Пандемия COVID-19 существенно повлияла на мировую экономику. Она заставила по-новому взглянуть на деятельность РХК России в контексте обеспечения населения полноценными белками животного и растительного морского происхождения. Эти белки имеют важное значение для повышения сопротивляемости человеческого организма всевозможным штаммам вируса SARS-CoV-2, вызывающего COVID-19, сокращения реабилитационного периода после перенесенной болезни, сохранения и повышения качества жизни населения при естественном снижении возможностей бюджетов всех уровней, включая семейные, в период пандемии.

Исследования многих факторов, в т.ч. генетических и климатических, на динамику распространения COVID-19 не дают однозначных результатов, за исключением поведенческих и прививочных (своевременный цикл прививок, ношение масок, сокращение контактов и т.д.) [1]. По мнению большинства ученых, загрязнения воздуха повышают смертность от COVID-19, хотя пока мало понимания того, каким образом те или иные загрязнения атмосферы влияют на передачу SARS-

CoV-2. Но при этом есть понимание того, что сама рыба и иные морские ВБР не являются переносчиками вируса SARS-CoV-2 [2,3].

Иммунная система организма распознает и определяет вредность вирусов и микробов, принимает меры к устранению вредных и генерирует иммунологическую память. Недостаточное или неполноценное питание приводит к снижению иммунитета, которое выражается с возрастом сильнее. Ученые едины и в другом – повышение иммунитета за счет хорошей экологии и ведения здорового образа жизни, здорового полноценного питания, к которому относятся, в первую очередь животные белки, свежие овощи и фрукты, существенно ослабляют воздействие штаммов вируса SARS-CoV-2 на организм человека, облегчают протекание болезни и сокращают реабилитационный период после неё [4-6]. Хроническая нехватка белкового питания и загрязненный воздух способствуют пролонгации болезни и повышенной смертности от COVID-19 [4]. Лучшим поставщиком белков являются морские биоресурсы. По уточненным данным ФАО, рыбный сектор мировой экономики произвел в 2018 году 188 млн т. ВБР, в т.ч., 156 млн т. рыбы и 32 млн т. водных растений для непосредственного потребления в пищу [7].

Следует отметить, что ок. 2/3 улова (65,4%) обеспечивается в биологически устойчивых

акваториях, где рыбный промысел ведется рационально, без превышения предельно допустимой нагрузки на уровень запасов биовидов, а в трети акваторий это условие не выполняется и промысел является неустойчивым. При переработке в пищу не менее 35 процентов улова теряется безвозвратно. Альтернативой наращиванию улова является исключение либо сведение к минимуму потерь, повышение глубины переработки рыбного сырья, рециклинг. Современные технологии позволяют получать из рыбных отходов необходимые для полноценного питания и легко усваиваемые белки, и жиры - протеины, нутриенты, витамины, микроэлементы, играющие важную роль в повышении иммунитета и снижении заболеваний человека, особенно в периоды пандемии.

1. Пандемия COVID-19 – вызов и стимул для формирования новой экосистемы рыбохозяйственного комплекса России

Первый случай COVID-19 в России был зарегистрирован 31 января 2020. По состоянию на 1 августа 2021 года число заболевших по стране составило 6207513 из которых летальный исход составил 156726, или 2,52% от числа заболевших COVID-19, число заболевших во всем мире – 198879142 человека, из которых выздоровели 179521450, умерли 4238503 (2,13%). В целом картина по 10 странам с наибольшим количеством заболевших представлена на рисунке 1.

Наибольшее число заболевших в процентном отношении к численности населения страны в Нидерландах – 10,9%, США – 10,5%, Бразилии – 9,3%, Франции – 9,2%, Великобритании – 8,7%, наименьшее в Китае – 0,008%. Численность заболевших, нормированная на численность населения по странам, отличается по состоянию на 01.08.2021 г. примерно в 1400 раз. Динамика изменения заболеваемости COVID-19 в ряде стран с апреля 2020 года, когда пандемия получила зримые черты, представлена на рисунке 2.

Пандемия COVID-19 заставила по-новому взглянуть на решение проблем в экономической, социальной, экологической сферах жизнедеятельности, принятых рассматривать в качестве основы устойчивого развития. В центре решения всех проблем находится человек, потенциал общества. Поэтому здоровье человека, нации и жизнеспособность в экстремальных условиях, в которые ввела пандемия COVID-19 многие регионы мира, играют важное значение, если не утверждать – определяющее. Исследования показывают, что последствия COVID-19 для здоровья и качества жизни выходят далеко за рамки острой инфекции даже среди тех, кто переболел в легкой форме: от 29% до 36% пациентов, переболевших COVID-19, наблюдавшие в течение 1 - 9 месяцев после болезни сообщили о постоянных симптомах [8-11].

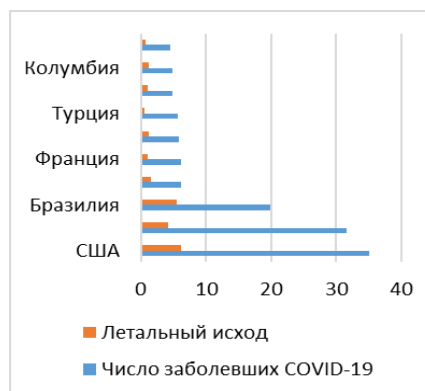
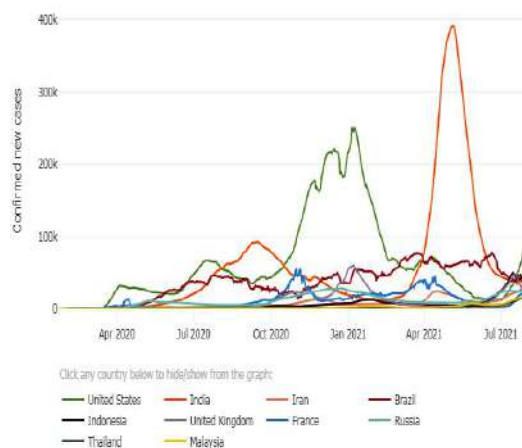
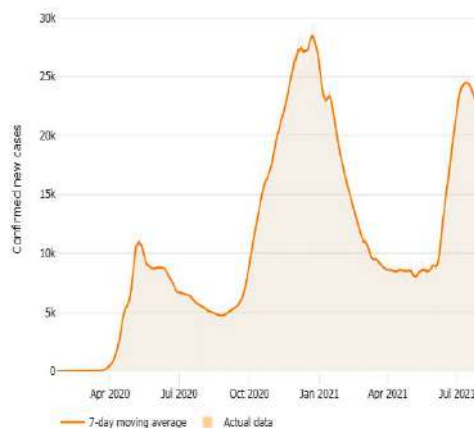


Рис. 1. Число заболевших COVID-19 (x10⁶, нижние голубые бруски) и число летальных исходов (x10⁵, верхние коричневые бруски).

График построен по данным мониторинга Ковид-центра университета Хопкинса по состоянию на 01.08.2021г. <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>



2а. По отдельным странам



2б. По России.

Рис. 2. Динамика изменения заболеваемости COVID-19 с апреля 2020 года.

Графики на рисунке 2а приведены в редакции Ковид-центра университета Хопкинса, США, по состоянию на 01.08.2021 (см. <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>), график 2б по России, (см. <https://coronavirus.jhu.edu/data/new-cases>).

Свыше 30% пациентов отмечали ухудшение качества жизни, усталость, одышку, апатию ко всему, включая даже домашнюю работу, беспокойство, депрессию, бессонницу и когнитивные нарушения. Они ложатся тяжелым бременем на здравоохранение, приводя во многих странах к его кризису, к неспособности обеспечить полноценное белковое питание и лечение вследствие отсутствия ресурсов. В связи с этим возникают вопросы превентивных мер, способных снизить заболеваемость, разрушающее действие пандемии COVID-19 на социальную среду и экономику, вопросы повышения иммунитета, сопротивляемости организма воздействию штаммов вируса SARS-CoV-2, сокращения реабилитационного периода после перенесенной болезни, сведения к минимуму варианта пролонгированного многомесячного воздействия SARS-CoV-2 на организм человека.

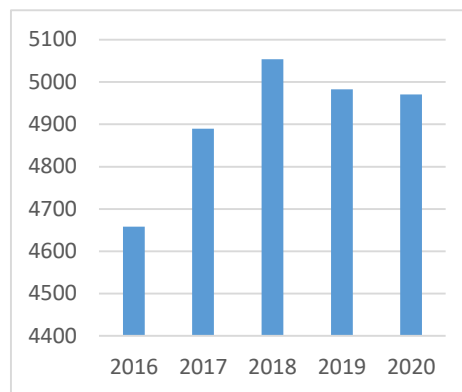
Одним из путей системного повышения иммунитета является организация массового здорового полноценного питания с использованием морской биопродукции [12-15]. В этом плане морские биологические ресурсы, как сырье для приготовления пищевой продукции, вне конкуренции, вследствие содержания в них всего комплекса необходимых для жизнедеятельности человека белков, нутриентов, витаминов и микроэлементов. Свежая рыба содержит 18–20% легкоусвояемого белка, все незаменимые для питания человека аминокислоты, включая изолейцин, необходимый для синтеза гемоглобина и повышения (поддержания) иммунитета, метионин, содействующий обмену веществ и обеспечивающий дезинтоксикацию организма, фенилаланин, предшественник адреналина, норадреналина, тирозина, допамина, улучшающий память и способность к обучению, уменьшающий боль и влияющий на настроение, триптофан, способствующий регулированию сна и аппетита, и др. [13,14,16].

В связи с изложенным в проблеме организации эффективного и устойчивого рыболовства и рыбоводства, переработки ВБР и доставки готовой продукции потребителю появляется новый импульс и рыбная отрасль, являющаяся важной частью мировой экономики, нуждается в новых направлениях развития - экосистемного.

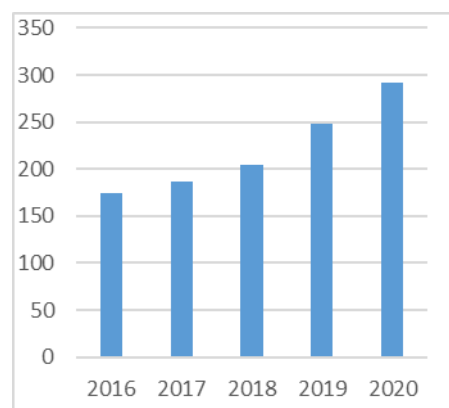
2. Экосистемный подход к решению проблем модернизации и цифровизации РХК

По уточненным данным Комитета по рыбному хозяйству ФАО [17], объем мировой рыбодобычи по итогам 2020 года составил 101,09 млн тонн. КРХ ФАО отметил прогнозное снижение промысловой активности до 6,5% вследствие ограничений, введенных системой здравоохранения различных стран в связи с пандемией COVID-19. По данным Коллегии Росрыболовства от 23 апреля 2021 года добыча российских рыбаков составила в 2020 году 4,97 млн тонн, а в целом в последние годы наблюдается нестабильная картина, рисунок 3а.

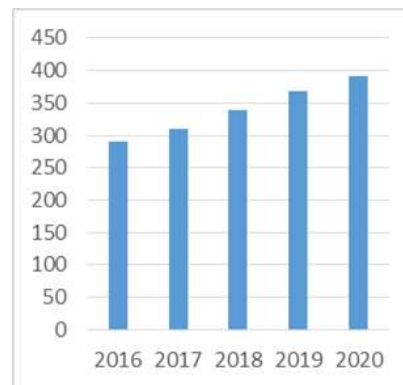
Рост аквакультуры, рисунок 3б, объясняется низкой начальной базой сравнения.



3а. Объемы добычи ВБР, включая товарную аквакультуру, тыс. тонн



3б. Объемы производства продукции товарной продукции аквакультуры (без посадочного материала) РХК России (тыс. тонн)



3в. Оборот организаций РХК России (млрд руб)

Рис. 3. Развитие рыбодобычи и рыбопроизводства и оборот организаций РХК России

Океан является уникальной средой, биоресурсы которого оцениваются в \$6,9 трлн, с научно обоснованными выполняемыми допустимыми объемами ежегодной добычи ВБР не менее \$1,5 трлн, причем эта оценка растет по мере развития новых районов добычи ВБР - Арктики, глубоководных горизонтов Океана, однако имеет свои пределы, обусловленные естественной воспроизводимостью ВБР без ущерба природе и интересам будущих поколений.

Из рисунка 3а следует, что в последние годы в рыбной отрасли России перестал расти объем добычи ВБР, инвестиции, вкладываемые государством и бизнесом, не дают должной отдачи по направлениям национальных целей развития, определенных Указом Президента России от 21 июля 2020 г. № 474 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года”.

Принятая и успешно реализуемая программа строительства рыболовных судов нового поколения, решая задачу восполнения рыболовного флота путем замены выводившихся из эксплуатации старых судов, которые по своему техническому состоянию уже не могут выходить в открытое море, решают проблему рыболовства частично. Они позволяют в определенной степени поддерживать и, возможно, увеличить морскую рыбодобычу и обеспечить сырьем РХК России. Однако, одной из важных проблем не только российского, но и всего мирового рыбохозяйственного комплекса являются потери, составляющие по оценкам Комитета по рыбному хозяйству ФАО не менее 35%.

Решение проблемы полной переработки рыбного сырья позволит решить проблему дефицита животного белка, ценных пищевых добавок на ближайшие десятилетия, не выходя за рамки научно обоснованных допустимых объемов добычи ВБР, восполняемых Мировым океаном. ВВП рыбной отрасли России может быть мультиплицирован и адаптирован к условиям пандемии COVID-19 широким внедрением результатов научных исследований и современных технологий в процессы добычи, транспортировки, переработки и поставки потребителю продукции при экосистемном подходе в организации деятельности РХК [12,19]. Для этого необходима разработка жизнеспособного алгоритма создания новой продукции.

3. Алгоритм жизненного цикла новой продукции

Жизненный цикл инновационного продукта можно разбить на 11 этапов, рисунок 4.

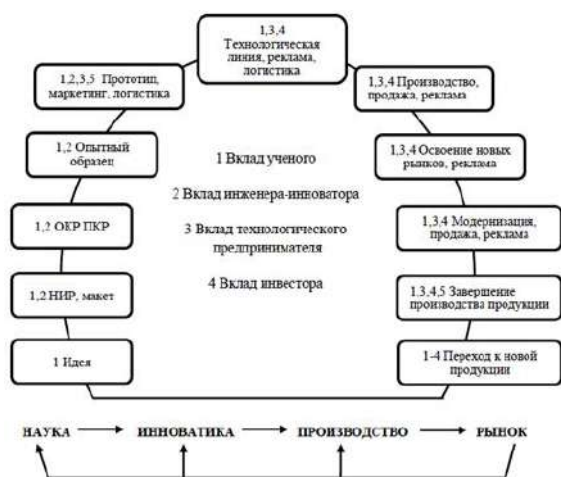


Рис. 4. Жизненный цикл продукта в инновационной экономике с учетом вклада стейкхолдеров на разных этапах создания производства продукции

В этой цепи создания новой продукции следует отметить этап 5, в котором выделяется прототипирование. Финансирование этапов 1 – 4,

НИОКР и ПКР, с созданием опытного образца продукции осуществляется, как правило, в России различными институтами государства, к крупнейшим из которых относятся Российский научный фонд, Российский фонд развития информационных технологий, Фонд перспективных исследований, Фонд содействия инновациям, Фонд Сколково и др. Организация производства (этапы 6 – 9) осуществляется бизнесом за счет собственных и привлекаемых средств, а этапы 10,11 – снятие продукции с производства совместными усилиями бизнеса и государства. Переходным моментом является этап 5 - прототипирование, который выпал из поля зрения государственных институтов, а бизнес, в силу высоких рисков успешного выхода инновационной продукции на рынок, без прототипа не берется за организацию производства новой продукции. Поэтому создание центров прототипирования при НИИ, КБ и университетах является необходимым условием успешной реализации алгоритма жизненного цикла новой продукции, успешного развития инновационного предпринимательства.

Другой типичной ошибкой модернизации предприятий и организаций различных отраслей экономики является цифровизация производственных процессов без пересмотра технологий переработки сырья в продукцию высокого передела. Информатизация с использованием цифровых платформ и др. инструментов цифровизации технологических процессов становится ключевой сквозной технологией не только жизненного цикла новой продукции, но и институтов управления в социальных и экономических системах.

Экосистемный подход позволяет трансформировать существующий рынок рыбной отрасли в новый рынок, основными движущими факторами которого являются специалисты новой формации, экспоненциальные производственные технологии и цифровизация. Симбиоз этих факторов обеспечивает превосходство продукции с точки зрения эффективности и потребительской ценности при более низкой цене, доступности вследствие сокращения пути от производителя до потребителя и исключения лишних звеньев. При этом жизнеспособные фрагменты прежнего рынка могут включаться в новую экосистему рыбной отрасли, обеспечивая преемственность и сохранение лучших традиций жизнедеятельности предприятий и организаций РХК, смягчая переход к новым условиям хозяйствования отраслевых специалистов и предприятий.

Цифровизация позволяет обеспечить прямой доступ каждого клиента, каждого человека к размещению заказа непосредственно на выбранном производстве, переводя рынок товаров в рынок услуг. С другой стороны, цифровизация позволяет подключить к распределенному производству множество микро- и малых предприятий, индивидуальных предпринимателей и отдельных лиц в технологические процессы создания уникальной и разнообразной продукции. Создается активная конкурентная массовая среда производителей, в которой преимущество имеют и побеждают креативные личности и новые экспоненциальные технологии (3D-печать, AR/VR,

робототехника, рециклинг и т.д.). Дивергентно-конвергентные процессы постепенно трансформируют бизнес-модели различных производств и РХК в целом.

Ассортимент рыбной продукции существенно расширится номенклатурой Hi-Tech – продукции, изготавливаемой, по сути, из традиционных отходов рыбного производства, то есть, не затрагивая объем существующей товарной отраслевой продукции. Hi-Tech – продукция создается с помощью новых биотехнологий продуктов питания, биологически активных веществ и пищевых добавок, которые сами являются продуктами экспоненциальных технологий [20] и потому обладают высокой потребительской ценностью и добавочной стоимостью.

Но при этом использование цифровых технологий и современных инструментов информационных экспоненциальных технологий (цифровые платформы, автоматизированные производства, роботизированная доставка, гибкие быстро перестраиваемые технологические линии, ситуационные центры управления сложными цепочками добычи, переработки, хранения и индивидуализированной поставки продукции по заявкам потребителей и др.) позволяют снизить цену продукции для потребителя, доводя их к социально приемлемым ценам.

Открытая экосистема РХК на единой цифровой платформе многократно сокращает время обновления выпускаемой продукции: от идеи до организации производства новой продукции, см.рис.4.

Ценность экосистемы РХК на единой цифровой платформе заключается в том, что она связывает в единую сеть, с одной стороны, огромное число рыбаков, судов, рыбодобывающих и рыбоперерабатывающих компаний, пищевых производств и потребителей, вплоть до каждого физического лица, а, с другой, - органы управления РХК с органами государственной власти и местного самоуправления, корпорациями, НИИ, КБ и вузами, обеспечивая организацию и сопровождение оперативной деятельности.

Появляется конкурентное преимущество РХК России в сравнении с крупными пищевыми производителями, включая международные корпорации, но цифровая платформа не снимает конкуренцию участников внутри платформы, причем во всех звеньях создания продукции – от организации улова, транспортировки, переработки и поставки готовой продукции потребителю. Экосистема позволяет обеспечить быстрый и естественный перевод деятельности всех участников в режим онлайн коммуникаций без сокращения функционала и ограничения возможностей, но с повышением оперативности реагирования на события, ситуации, внешние и внутренние вызовы.

При таком рассмотрении цифровая трансформация РХК России не является самоцелью, так как она не имеет смысла без глубокого научного переосмысления достижений современной науки, преломления и применения её достижений, воплощения в конкретных новых технологиях с учетом социальных, экономических и экологических факторов. Поэтому предлагается рассматривать процессы модернизации и цифровой трансформации

РХК, как и любой другой отрасли экономики, выстраиванием единого научного фундамента для решения проблем в цепочке: Человек – Общество – Природа – Технологии – Экономика, в которой цифровизация занимает определенное место в каждом из этих звеньев.

4. Роль экосистемы РХК в выполнении государственной программы России «Развитие рыбохозяйственного комплекса»

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 31 марта 2020 года №394 целью государственной программы Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса» является «обеспечение перехода от экспортно-сырьевого типа к инновационному типу развития на основе сохранения, воспроизводства, рационального использования ВБР, внедрения новых технологий, развития импортозамещающих подотраслей и обеспечение продовольственной независимости, конкурентоспособной российской рыбной продукции на внутреннем и внешнем рынках». Этим Постановлением предусмотрено обеспечение среднедушевого потребления населением страны рыбной продукции к 2024 году не менее 23,1 кг/чел, причем самообеспечение должно составить 85 процентов. По данным Росстата численность населения России на 1 января 2021 года составила 146,24 млн человек. При условии его сохранения в течение ближайших 4-х лет общий объем потребления рыбы и рыбной продукции должен составить в 2024 году 3,378 млн тонн или в переводе на объем улова с учетом 35 -50% отходов при переработке рыбы **5,197 – 6,756 млн тонн**.

Как уже отмечалось, добыча ВБР в 2020 году составила 4,97 млн тонн, объем производства товарной аквакультуры – 320 тысяч тонн, объем экспорта составил 2,237 млн тонн, импорта – 599 тысяч тонн. Таким образом, общий объем рыбы и рыбной продукции, без учета различного рода потерь, попавшей на внутренний рынок в 2020 году, составил **3,332 млн тонн**. Апроксимируя эти данные с учетом ожидаемых результатов реализации госпрограммы к 2024 году, а именно рост морского улова на 3 процента и прирост продукции аквакультуры в размере 6 – 10 (в среднем 8%) процентов ежегодно получим контрольную цифру объема рыбы и рыбной продукции, которая попадет на рынок России в 2024 году – **4,391 млн тонн** (5,594 млн тонн улова, 435 тысяч тонн аквакультуры и при ориентировочном сохранении объемов экспорта импорта на уровне 2020 года). Таким образом, дефицит рыбы и рыбной продукции составит в 2024 году в пределах 0,806 - 2,365 млн тонн.

Как отмечается в Госпрограмме, общий оцененный потенциал ВБР в 2024 году составит 5,5 млн тонн, объем произведенной рыбы и продуктов рыбных, переработанных и консервированных - **2,733 млн т**, в т.ч., в Калининградской области 411,1 тысяч тонн. Отметим, что по данным выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств ожидаемое среднее потребление рыбы и рыбопродукции по Калининградской области составит 16,1 кг/чел - на треть меньше рекомендованной ВОЗ нормы потребления.

Таким образом, запланированное повышение физических объемов улова и производства аквакультуры не может обеспечить выполнение контрольных цифр Госпрограммы «Развитие рыбохозяйственного комплекса». Задача обеспечения населения рыбой и рыбной продукцией в объемах, рекомендованных ВОЗ, может быть решена повышением глубины переработки ВБР и рециклинга в рамках предложенной цифровой экосистемы РХК. В предельном случае рециклинг позволяет использовать в качестве сырья все отходы производства, которые в настоящее время в рыбной отрасли России составляют от 35% до 50% перерабатываемого объема ВБР в зависимости от видов биоресурсов.

Детализируя этот тезис, необходимо остановиться на усилении важных направлений НИР, позволяющих снять остроту дефицита белков, нутриентов, витаминов и микроэлементов в питательном рационе населения России:

1. научные основы исследования перспектив организации и практической реализации на судах, в морских акваториях и приморских территориях безотходных высокотехнологичных автоматизированных производств (полный рециклинг), способных работать в автономном и автоматизированном режимах; для справки: Норвегия в 2020 году добилась уровня переработки отходов 86 процентов.

2. исследования влияния РХК на экологическую и социально-экономическую среду приморских регионов, на морские акватории Океана, обеспечивающие оценку рисков и надежное прогнозирование новых трендов развития и объемов улова РХК;

3. широкое внедрение результатов НИР в области биотехнологий и технологий продуктов питания, информатики, генетики, сенсорики и робототехники в инновационные и бизнес-процессы РХК;

4. научно обоснованная оценка рисков и вовлечение в хозяйственный оборот новых видов ВБР, освоение новых районов и пространств промысла, развитие аквакультуры с учетом изменений климата, антропогенного влияния на состояние ВБР в Океане и декарбонизации.

Таким образом, ценность науки для рыбной отрасли Российской Федерации заключается в том, что она является фундаментом кардинальной модернизации и цифровой трансформации РХК с учетом глобальных проблем Мирового Океана и Доктрины продовольственной безопасности России для обеспечения устойчивого развития социальной экономики и повышения качества жизни населения страны.

Необходимо отметить один очень важный момент: ценность науки заключается в создании фундамента всех прошлых, настоящих и будущих разумных прогрессивных и преобразовательных преобразований в обществе и экономике с бережным отношением к природе. Отсюда можно перейти к цене науки. С одной стороны, наука бесценна, так как она является основой прогресса, с другой, с утилитарной точки зрения, цену науки можно определить относительными размерами, долей финансирования в общем бюджете каждой страны. Но определяющим цену науки показателем является

в конечном счете экономическая отдача на единицу затрат при обязательном условии повышения качества жизни человека, населения страны.

Чем выше качество жизни, чем больше экономическая отдача науки, тем развитее страна и есть убеждение в том, что доля науки в суммарном бюджете всех стран мира будет расти по мере развития человечества. При этом важное значение имеют «точки приложения» науки – какие стратегические цели ставятся перед ней с учетом директивных документов, принимаемых руководством страны.

Выполнение НИР в перечисленных направлениях должно сопровождаться ускоренной модернизацией и цифровизацией РХК с использованием цифровых платформ, ситуационных центров, Big Data, ИИ и др. инструментов информационных технологий с формированием вертикально интегрированной системной конвергентной опережающей профессиональной подготовки кадров на основе рапид-форсайтов в РХК.

Усиление перечисленных направлений НИР позволит снять остроту проблемы белковой недостаточности в рационе населения России и, как показывают оценки [12],кратно повысить объемы продукции РХК в стоимостном выражении.

Заключение

Представлен технологический алгоритм полного жизненного цикла новой продукции РХК в контексте развития государственно-частного партнерства с определением вкладов сторон на каждом этапе жизненного цикла в процессе формирования новой экосистемы рыбохозяйственного комплекса России в современных условиях.

Неопределенным этапом успешности нового продукта является этап прототипирования, когда государство, завершив финансовую поддержку НИОКР, переключается на дальнейшее финансирование работ на бизнес, а бизнес считает слишком рискованным включаться в финансирование нового продукта, не имея работающего прототипа. Необходимы отраслевые центры прототипирования в ключевых приморских регионах – выходах России в Мировой океан, новые инструменты организации финансирования и стимулирования работ по постановке новой продукции на производство на этом этапе работ. Одним из вариантов решения проблемы может стать беспроцентное кредитование этапа прототипирования специализированными финансовыми институтами с государственным участием.

С учетом уроков пандемии COVID-19 и возросшей потребности населения в продукции РХК валовый объем производства можно существенно увеличить одновременным внедрением результатов НИОКР и цифровизации в процессы добычи, транспортировки, переработки и поставки потребителю продукции. Для этого необходима реализация экосистемного подхода на единой цифровой платформе в деятельности РХК. Условием успеха создаваемой цифровой экосистемы является человекоцентричный подход. Цифровизация, занимая определенное место в каждом из звеньев технологической модернизации РХК как экосистемы, создает условия синергии в производственной сети.

Экосистемный подход в организации новых производств глубокой переработки ВБР и рециклинга, систем комплексной мультитрофной аква- и марикультуры в прибрежных акваториях обеспечит устойчивое развитие приморских регионов России.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «КГТУ» на 2021 год: «Изучение сетевой организации рыбной отрасли региона с использованием цифровой платформы».

Литература

1. Benjamin Zaitchik. Does weather affect the transmission of COVID-19? Q&A: Covid-19 transmission linked to behavioral not meteorological factors. Johns Hopkins University-Medicine. Coronavirus Resource Center, March 25, 2021. <https://coronavirus.jhu.edu/tracking/q-n-a/covid-19-transmission-linked-to-behavioral-not-meteorological-factors>.
2. Matthew Zirui Tay, Chek Meng Poh, Laurent Rénia, Paul A. MacAry & Lisa F. P. Ng The trinity of COVID-19: immunity, inflammation and intervention. Nature Reviews Immunology volume 20, pages 363–374 (2020). <https://www.nature.com/articles/s41577-020-0311-8/>.
3. ФАО, КРХ. Декларация Комитета по рыбному хозяйству об устойчивости рыболовства и аквакультуры 2021 года. 1–5 февраля 2021 года.
4. Philip C. Calder. Nutrition and immunity: lessons for COVID-19 European Journal of Clinical Nutrition (23 June 2021) <https://www.nature.com/articles/s41430-021-00949-8>.
5. Rayman MP, Calder PC. Optimising COVID-19 vaccine efficacy by ensuring nutritional adequacy. Brit J Nutr. <https://doi.org/10.1017/S0007114521000386>. 2021.
6. Calder PC, Carr AC, Gombart AF, Eggersdorfer M. Optimal nutritional status for a well-functioning immune system is an important factor to protect against viral infections. Nutrients.2020;12:1181. <https://doi.org/10.3390/nu12041181>.
7. ФАО. 2020. Краткое описание воздействия пандемии COVID-19 на сектор рыболовства и аквакультуры: добавление к докладу “Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2020”. Рим. <https://doi.org/10.4060/ca9349ru>.
8. Del Rio C, Collins LF, Malani P. Long-term health consequences of COVID-19. JAMA. Published online October 5, 2020. doi:10.1001/jama.2020.19719.
9. Garrigues E, Janvier P, Kherabi Y, et al. Post-discharge persistent symptoms and health-related quality of life after hospitalization for COVID-19. J Infect. 2020;81(6):e4–e6. doi:10.1016/j.jinf.2020.08.029.
10. Jennifer K. Logue, Nicholas M. Franko, Denise J. McCulloch, Dylan McDonald, Ariana Magedson, Caitlin R. Wolf, Helen Y. Chu. Sequelae in Adults at 6 Months After COVID-19 Infection. JAMA Network Open. 2021;4(2):e210830. doi:10.1001/jamanetworkopen.2021.0830 February 19, 2021.
11. COVID-19: Make it the Last Pandemic by The Independent Panel for Pandemic Preparedness & Response. https://theindependentpanel.org/wp-content/uploads/2021/05/COVID-19-Make-it-the-Last-Pandemic_final.pdf.
12. Майтаков Ф.Г. Яфасов А.Я. Концепция цифровой платформы региональной системы персонального питания. Морские интеллектуальные технологии. 2020, т.1, с. 176–185.
13. Philip C. Calder. Nutrition and immunity: lessons for COVID-19 European Journal of Clinical Nutrition. <https://doi.org/10.1038/s41430-021-00949-8> (23 June 2021). <https://www.nature.com/articles/s41430-021-00949-8>.
14. Van Zanten ARH, De Waele E, Wischmeyer PE (2019) Nutrition therapy and critical illness: practical guidance for the ICU, post-ICU, and long-term convalescence phases. Crit Care, 23:368. doi.org/10.1186/s13054-019-2657-5
15. ФАО, МФСР, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. 2020 год. Положение дел в области продовольственной безопасности и питания в мире – 2020. Преобразование продовольственных систем для обеспечения финансовой доступности здорового питания. Рим, ФАО. <https://doi.org/10.4060/ca9692ru>.
16. В.А.Волкогон, Н.А.Кострикова, А.Я.Яфасов. Морские предпринимательские университеты в морской экономике России в новых условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2017, т.2, с. 142-151.
17. Доклад Комитета по рыбному хозяйству ФАО "Состояние мирового рыболовства и аквакультуры" 2020 года (СОФИА 2020).
18. ФАО. 2020. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2020. Меры по повышению устойчивости. Рим, ФАО, 223 с. <https://doi.org/10.4060/ca8642ru>.
19. А. Я. Яфасов, А. А. Меркулов, Ф. Г. Майтаков. Роль цифровой трансформации в диверсификации рыбной отрасли на примере организации персонализированного питания в регионе. Известия КГТУ, №6, 2021 г, с.121-132. DOI 10.46845/1997-3071-2021-61-121-132
20. Н.Ю.Мезенова. Разработка технологии биопродукта для спортивного питания с использованием биомодифицированного коллагенсодержащего рыбного сырья." Канд. дисс. Калининград, КГТУ, 2017 г, 223 с. <https://klgtu.ru/upload/science/soviets/dis/0%20mezenova-dissertaziya.pdf>

References

1. Benjamin Zaitchik. Does weather affect the transmission of COVID-19? Q&A: Covid-19 transmission linked to behavioral not meteorological factors. Johns Hopkins University-Medicine. Coronavirus Resource Center, March 25, 2021. <https://coronavirus.jhu.edu/tracking/q-n-a/covid-19-transmission-linked-to-behavioral-not-meteorological-factors>.
2. Matthew Zirui Tay, Chek Meng Poh, Laurent Rénia, Paul A. MacAry & Lisa F. P. Ng The trinity of COVID-19: immunity, inflammation and intervention. Nature Reviews Immunology volume 20, pages 363–374 (2020). <https://www.nature.com/articles/s41577-020-0311-8/>.

3. FAO, COFI. Committee on Fisheries Declaration on the Sustainability of Fisheries and Aquaculture 2021. February 1-5, 2021.
4. Philip C. Calder. Nutrition and immunity: lessons for COVID-19 European Journal of Clinical Nutrition (23 June 2021) <https://www.nature.com/articles/s41430-021-00949-8>.
5. Rayman MP, Calder PC. Optimising COVID-19 vaccine efficacy by ensuring nutritional adequacy. Brit J Nutr. <https://doi.org/10.1017/S0007114521000386>. 2021.
6. Calder PC, Carr AC, Gombart AF, Eggersdorfer M. Optimal nutritional status for a well-functioning immune system is an important factor to protect against viral infections. Nutrients.2020;12:1181. <https://doi.org/10.3390/nu12041181>.
7. FAO. 2020. Summary of the Impact of the COVID-19 Pandemic on the Fisheries and Aquaculture Sector: Supplement to The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9349ru>.
8. Del Rio C, Collins LF, Malani P. Long-term health consequences of COVID-19. JAMA. Published online October 5, 2020. doi:10.1001/jama.2020.19719.
9. Garrigues E, Janvier P, Kherabi Y, et al. Post-discharge persistent symptoms and health-related quality of life after hospitalization for COVID-19. J Infect. 2020;81(6):e4-e6. doi:10.1016/j.jinf.2020.08.029.
10. Jennifer K. Logue, Nicholas M. Franko, Denise J. McCulloch, Dylan McDonald, Ariana Magedson, Caitlin R. Wolf, Helen Y. Chu. Sequelae in Adults at 6 Months After COVID-19 Infection. JAMA Network Open. 2021;4(2):e210830. doi:10.1001/jamanetworkopen.2021.0830 February 19, 2021.
11. COVID-19: Make it the Last Pandemic by The Independent Panel for Pandemic Preparedness & Response. https://theindependentpanel.org/wp-content/uploads/2021/05/COVID-19-Make-it-the-Last-Pandemic_final.pdf.
12. Maitakov F.G. Yafasov A.Ya. The concept of a digital platform for a regional personal food system. Marine Intelligent Technologies. 2020, vol. 1, p. 176-185.
13. Philip C. Calder. Nutrition and immunity: lessons for COVID-19 European Journal of Clinical Nutrition. <https://doi.org/10.1038/s41430-021-00949-8> (23 June 2021). <https://www.nature.com/articles/s41430-021-00949-8>.
14. Van Zanten ARH, De Waele E, Wischmeyer PE (2019) Nutrition therapy and critical illness: practical guidance for the ICU, post-ICU, and long-term convalescence phases. Crit Care, 23:368. doi.org/10.1186/s13054-019-2657-5
15. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2020 year. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming Food Systems to Ensure Financial Inclusion of Healthy Nutrition. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692ru>.
16. V.A.Volkogon, N.A.Kostrikova, A.Ya. Yafasov. Maritime Entrepreneurial Universities in the Russian Maritime Economy in New Conditions. Marine Intelligent Technologies. 2017, vol. 2, p. 142-151.
17. Report of the FAO Committee on Fisheries, The State of World Fisheries and Aquaculture 2020 (SOFIA 2020).
18. FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Measures to Increase Resilience. Rome, FAO, 223 pp. <https://doi.org/10.4060/ca8642ru>.
19. A. Ya. Yafasov, A. A. Merkulov, F. G. Maitakov. The role of digital transformation in the diversification of the fish industry through the organization of personalized food in the region. Izvestia KSTU, No. 6, 2021, pp. 121-132. DOI 10.46845 / 1997-3071-2021-61-121-132
20. N.Yu. Mezenova. Development of bioproduct technology for sports nutrition using biomodified collagen-containing fish raw materials. "Candidate of thesis. Kaliningrad, KSTU, 2017, 223 pp. dissertaziya.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абдурашид Яруллаевич Яфасов, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления инновационной деятельности, Калининградский государственный технический университет, 236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: yafasov@list.ru, ORCID: 0000-0002-9251-1187

Abdurashid Y. Yafasov, Dr.Sci.(Eng), Senior Researcher, Head of Innovations, Kaliningrad State Technical University, 236022, Russia, Kaliningrad, Sovietsky prospect, 1, e-mail: yafasov@list.ru, ORCID: 0000-0002-9251-1187

Наталья Анатольевна Кострикова, кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе, Калининградский государственный технический университет, 236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-2969-0346

Natalya A. Kostrikova, Ph.D. (Phys & Math), vice-rector for science, Kaliningrad State Technical University, 236022, Russia, Kaliningrad, Sovietsky prospect, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-2969-0346

Поступила в редакцию: 19.06.2021
Принята к публикации: 15.08.2021

УДК 004.8+316.334.22

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.030>

Процесс управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса как объект моделирования

О.Г. Огий¹, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru, В.Ю. Осипов², e-mail: osipov.v@iias.spb.su, А.Б. Тристанов¹, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru, Н.А. Жукова², e-mail: nazhukova@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет, ²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация В работе представлен подход к управлению трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса как сложного, динамического, нечетко определенного объекта управления. Трудовой потенциал рассматривается как ключевой конструкт стратегии управления отраслевым комплексом и резервом повышения его эффективности. В целях выбора и обоснования ключевых методов и алгоритмов построения систем поддержки принятия решений, а также технологических решений для задачи идентификации модели управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса выполнен анализ применимости для этого искусственных нейронных сетей. Показано, что вследствие сложности определения объекта моделирования, эффективным является многомодельный подход, позволяющий изучить данный феномен с различных точек зрения. Предложена одна из возможных динамических моделей описывающая динамику профессионально-компетентностной компоненты трудового потенциала. Определена целесообразность применения методов искусственного интеллекта в вопросах управления трудовым потенциалом.

Ключевые слова: трудовой потенциал, моделирование, искусственный интеллект, нейронные сети, многомодельный подход, рыбохозяйственный комплекс, управление

The process of labor potential managing of the fishery complex as a modeling object

Oksana G. Ogij¹, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru, Vasilii Y. Osipov², e-mail: osipov.v@iias.spb.su, Alexander B. Tristanov¹, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru, Natalia A. Zhukova², e-mail: nazhukova@mail.ru
¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, ²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract The paper presents an approach to the management of the fishery complex labor potential as an elaborate, dynamic, vaguely defined object of management. Labor potential is considered a key element of the industry complex management strategy and a fund to increase its efficiency. Analysis of artificial neural networks applicability was carried out in order to select and justify key methods and algorithms for decision support systems arrangements as well as technological solutions for the problem of identifying a model for managing the labor potential of the fishery complex. It is shown that a multi-model approach is effective due to the complexity of determining the object of modeling as that allows studying this phenomenon from different perspectives. One of the possible dynamic models is proposed which describes the dynamics of the professional-competence component of labor potential. The expediency of using artificial intelligence methods in matters of labor potential management has been determined.

Keywords: labor potential, modeling, artificial intelligence, artificial neural networks, multi-model approach, fishery complex, management

Введение

Современный рыбохозяйственный комплекс (РХК) России представляет собой сложноструктурированный динамический объект, который включает три ключевых элемента, значимых с позиции управления.

Первым из них выступает производственно-хозяйственная система, которую составляет совокупность организаций разной функциональной специализации: добыча и переработка водных биологических ресурсов (ВБР); товарная аквакультура; строительство и эксплуатация рыбопромыслового флота; управление рыбными терминалами морских портов, складская и транспортная логистика; мониторинг и охрана ВБР; научная и образовательная деятельность. Производственно-хозяйственная система рыбной отрасли обеспечивает полный воспроизводственный цикл, начиная от научных прогнозов и подготовки кадров, заканчивая реализацией продукции глубокой переработки ВБР и их отходов, что является существенным преимуществом с позиции самодостаточности и продуктивности системы.

Вместе с тем, отраслевая производственно-хозяйственная система обладает свойством высокой организационной сложности в силу разнородности ее составляющих (предприятия разных форм собственности; индивидуальные предприниматели; холдинги, в т.ч. с иностранным участием; рыболовецкие колхозы и артели; государственные предприятия и учреждения; органы госвласти; общественные организации и др.), а также территориальной и бассейновой многомерности, что делает её сложным динамическим объектом управления.

Второй значимый, с позиции управления, элемент объекта - РХК представлен архитектурой отраслевого рынка, где высокая сложность детерминируется: 1) его сетевой многоядерной организацией; 2) сочетанием дестабилизации, регулирования и самоорганизации.

Третий элемент – это процессы развития РХК как социально-экономического объекта, которые характеризуются нелинейностью и волатильностью, а также процессы управления этим развитием, которые определяют все разнообразие управленческих функций и, напротив, должны

формировать весьма определенные наилучшие результативные практики.

Таким образом, поиск научно-обоснованного подхода к совершенствованию управления РХК является амбициозной исследовательской задачей, решение которой требует определенной методологической стратегии.

В качестве основного конструкта такой стратегии авторы используют категорию «трудовой потенциал». Эта категория обладает значительной исследовательской перспективой, поскольку позволяет исследовать в комплексе производственно-значимые свойства актора (от характеристик отдельного работника до отраслевого комплекса), средовые свойства (технику, технологии, материальную базу) и качество менеджмента (анализа, планирования, координации, контроля и др.). Именно взаимодействие этих трех полей определяет потенциал, что, в свою очередь, позволяет эффективно определять содержание и интенсивность управленческого воздействия.

Трудовой потенциал как сложный, динамический и нечетко определенный объект

Эффективность управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса (РХК) во многом зависит от обоснованности принимаемых управленческих решений. Для обоснования таких решений применяют различные методы, учитывающие специфику формализуемого процесса, его цели и условия реализации. В последние годы в условиях нестабильности и быстрого изменения внешней и внутренней среды меняются структура и принципы управления РХК и его трудовой потенциалом [1–3]. Резко возросли объемы разнородных и нечетких данных, которые необходимо обрабатывать при принятии управленческих решений. При этом управление трудовым потенциалом РХК должно осуществляться на основе непрерывной предиктивной аналитики и системного подхода с гибким оперативным руководством и тактическим планированием при сохранении стратегической цели.

Трудовой потенциал является сложным многокомпонентным объектом, и в настоящее время научная общественность не пришла к единому мнению о формулировке этого понятия. В связи с этим не существует единых подходов к моделированию динамики трудового потенциала, поскольку не достаточно точно определен объект моделирования [2,4]. Данная проблема не редка в трудноформализуемых областях знания, таких как социология и экономика. Это сталкивает нас с задачей формализации объекта исследования и использования многомодельного подхода к изучению трудового потенциала и его динамики [5-13].

Дадим феноменологическое определение трудового потенциала, на которое будем опираться далее. Трудовой потенциал – социальный феномен, объясняющий способность актора (работника, коллектива) к выполнению трудовой функции, чувствительный к взаимодействию с другими трудовыми потенциалами, изменениям трудовой среды и проявляющий себя в процессе трудовой деятельности.

Система трудового потенциала является сложной и многообразной, обладающей определенной

многослойностью и координирующей ее иерархией связей и взаимоотношений составляющих ее элементов. Для наиболее полного формирования признакового описания трудового потенциала как объекта моделирования исследуются такие его компоненты [3,4]:

- физиологическая (параметры индивидуального актора: пол, возраст, текущее физическое состояние организма, психофизиологический статус, индивидуальный профиль здоровья, адаптационный потенциал здоровья);
- психическая (мышление и интеллект, актуальное психическое состояние, особенности личности, акцентуации характера, психофизиологические резервы, волевая регуляция, девиация);
- профессионально – квалификационная (образование, квалификация, опыт профессиональной деятельности, трудовой стаж, знания, умения, навыки, профессиональные компетенции, способность к самообразованию);
- социальная (коммуникабельность, групповая интегрированность, лидерство, конфликтность, индивидуализм/коллективизм, социальная активность, социальные установки, ментальные установки, социальная идентичность, ценностные ориентации, нравственная надежность, нравственная мотивация).

Необходимо отметить, что указанные компоненты могут относиться как к отдельному человеку, так и к различным социальным общностям, в т. ч. к судовой команде, персоналу предприятия, территориальному или отраслевому сообществу в целом. Однако, параметры, отражающие характеристики актора в той или иной компоненте, обобщаются на каждом, более высоком уровне. Например, параметр «возраст» работника, на уровне предприятия трансформируется в параметр «ядро кадрового состава», где оценивается доля работников в возрасте от 25 до 50 лет в общем количестве персонала, на уровне отрасли – в «возрастную структуру», где оценивается оптимальность соотношения различных возрастных групп.

Процесс управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса как объект моделирования

В интересах анализа процесса управления трудовым потенциалом как объектом моделирования рассмотрим одну из упрощенных динамических моделей трудового потенциала, представленную на рис.1. Согласно рис. 1 в этой модели выделено четырнадцать состояний: 1 – рождение детей, которые вырастут и включатся в трудовую деятельность; 2 – получение детьми среднего образования в различных школах (гимназиях), наделение выпускников определенными свойствами для дальнейшего обучения, познавательной и трудовой деятельности; 3, 4, 5, 8, 12, 13 – временная неработоспособность населения из-за болезней и других причин; 6 – получение молодыми людьми профессионального образования в различных учебных заведениях, наделение выпускников специальными знаниями и навыками; 7 – получение людьми высшего образования в университетах, с последующим повышением квалификации для занятия различных должностей, требующих высокой квалификации от работников; 9 – трудовая

деятельность лиц со средним профессиональным образованием с занятием должностей в РХК; 9.1, 9.2, 9.3, ...,9; 10 – трудовая деятельность лиц со средним не специальным образованием в РХК; 11 – трудовая деятельность лиц с высшим образованием с занятием должностей в РХК 11.1, 11.2, ...,11.r; 14 – завершение трудовой деятельности. Каждому из этих состояний можно поставить в соответствие вероятность нахождения в нем людей, связанных с РХК. Дуги на графе (рис. 1) соответствуют интенсивностям переходов трудового потенциала из одного состояния в другое.

Заметим, что в этой модели замещение лицом конкретной должности в РХК предполагает, что он по своему трудовому потенциалу удовлетворяет предъявляемым требованиям. В этом плане трудовой потенциал РХК может оцениваться возможностями текущих и потенциальных работников успешно выполнять различные должностные функции в РХК.

На примере этой модели в процессе управления трудовым потенциалом РХК можно выделить три обобщенных состояния (рис. 2):

- состояние получения данных о трудовом потенциале на различных уровнях иерархии;
- состояние анализа данных о трудовом потенциале и требований к нему, обоснования и принятия управляющих решений;
- состояние реализации управляющих решений.

С формальной точки зрения управление трудовым потенциалом в рамках рассматриваемой модели может сводиться к изменениям интенсивностей переходов процесса на рис. 1 из

одних состояний в другие. При этом могут преследоваться различные цели в структурных элементах РХК в зависимости от их назначения, состояния, внешних и внутренней среды функционирования.

Среди таких целей могут выступать:

- максимальное удовлетворение потребностей РХК или его отдельных подсистем необходимыми специалистами, рабочими и служащими;
- повышение качества подготовки лиц, предназначенных для работы в РХК, наделение их необходимыми знаниями, навыками;
- минимизация рисков при выполнении работ в РХК, связанных с человеческим фактором;
- целесообразное распределение работников по наиболее подходящим им должностям;
- снижение текучести кадров;
- своевременное распознавание, предсказание и устранение причин снижения показателей трудового потенциала;
- повышение достоверности и оперативности обработки информации о трудовом потенциале;
- обеспечение заданного уровня здоровья, условий труда и безопасности сотрудников РХК;
- повышение уровня накопления и передачи опыта деятельности в РХК и другие цели.

Заметим, что достижение этих целей, как правило, осуществляется в условиях высокой неопределенности многих событий, необходимости учета множества разнородных факторов, обработки больших объемов информации о людях, их возможностях, и специфике труда в РХК.

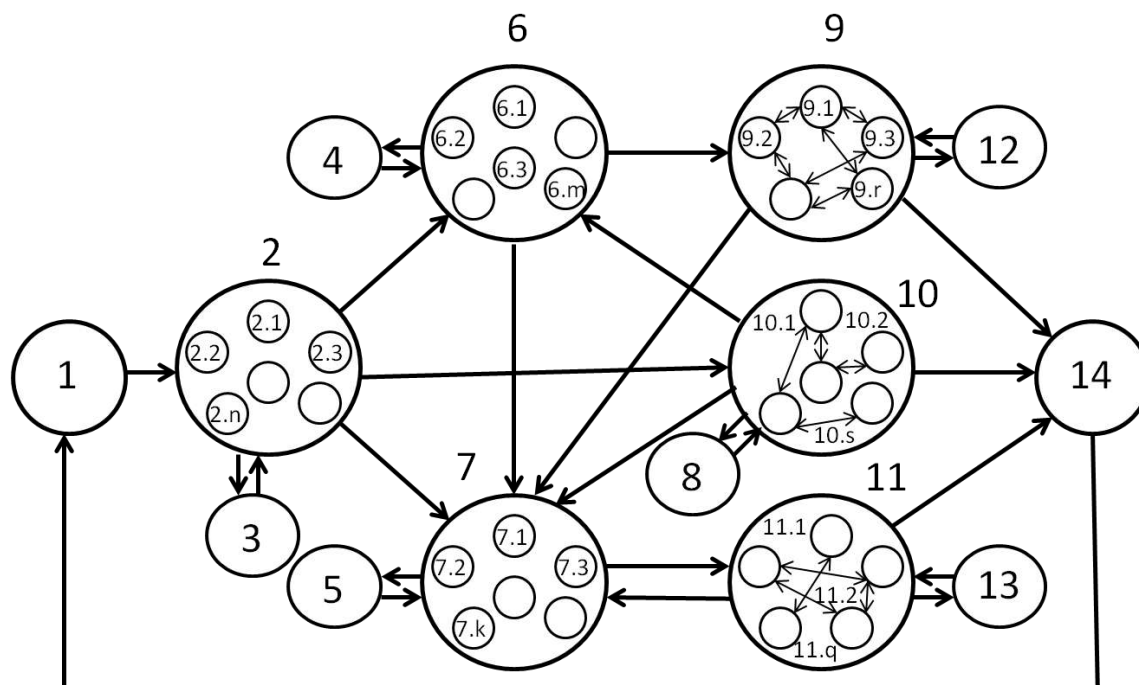


Рис. 1. Упрощенная динамическая модель трудового потенциала

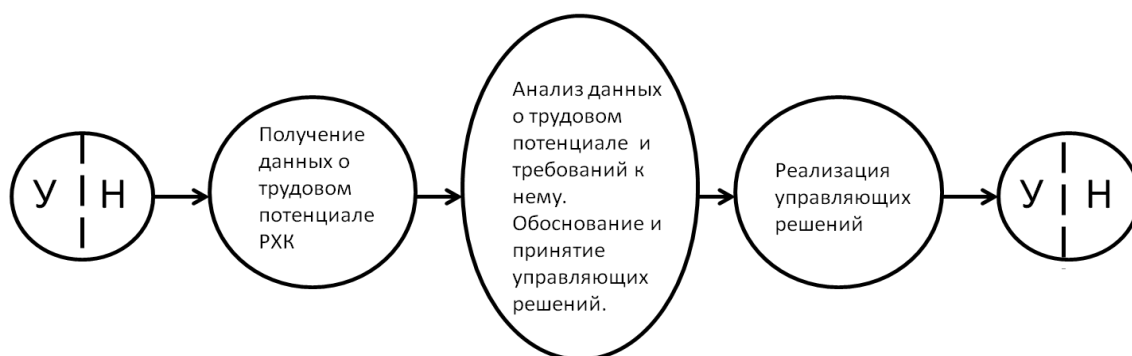


Рис. 2. Обобщенная модель управления трудовым потенциалом: Н – наблюдение за трудовым потенциалом; У – управление им.

В этой связи, целесообразно, чтобы в практике управления трудовым потенциалом РХК многие творческие функции, выполняемые сотрудниками кадровых органов, могли реализовываться с использованием методов искусственного интеллекта.

Место искусственных нейронных сетей в управлении трудовым потенциалом

В настоящее время для поддержки решений в области управления трудовым потенциалом используются интеллектуальные системы, построенные на основе применения методов обработки знаний (символов) [14]. Применению нейронных сетей уделено мало внимания. Только в последние годы с развитием этих сетей, технологий их обучения и реализации внимание к ним резко возросло. Начали появляться интеллектуальные системы поддержки принятия управляющих решений, построенные с использованием, как методов обработки знаний, так и искусственных нейронных сетей. Однако уровень развития этих интеллектуальных систем пока далек от совершенства из-за не проработанности многих вопросов, связанных с применением искусственных нейронных сетей для решения творческих задач управления трудовым потенциалом.

Принимая во внимание специфику анализируемого процесса к основным творческим задачам, связанным с управлением трудовым потенциалом РХК, которые могут реализовываться с применением известных искусственных нейронных сетей, предлагается отнести:

1) задачи прогнозирования событий на различных уровнях иерархии РХК. Может осуществляться прогноз потребностей различных людских ресурсов для РХК и прогноз удовлетворения этих потребностей на заданный момент времени. Осуществимо прогнозирование текучести кадров, здоровья сотрудников, изменений условий труда, повышения квалификации, появления новых специальностей, рабочих мест, удовлетворенности работников условиями труда, возможных трудовых конфликтов и других событий;

2) задачи распознавания лиц, ситуаций и событий, связанных с трудовым потенциалом РХК. Своевременно могут распознавать неблагоприятные условия для поддержания показателей трудового потенциала РХК на должном уровне. Возможно распознавание различных финансовых, экономических, психологических, информационных и

других угроз для сотрудников РХК. Реализуемо распознавание склонностей к различным действиям нанимаемых на работу сотрудников, распознавание их правдивых и ложных утверждений;

3) задачи машинной обработки речи, преобразования устной речи в текст и наоборот, перевода речи с одного языка на другой;

4) задачи ассоциативного запоминания информации о сложных трудно формализуемых событиях и формировании моделей этих событий в искусственных нейронных сетях, извлечения из памяти связанных неявных фактов;

5) задачи потоковой предварительной обработки больших объемов данных с устранением ложной информации, сглаживанием выбросов;

6) задачи когнитивного управления получения информации о трудовом потенциале. Эти задачи предусматривают осознанное машинное добывание информации, которая в настоящий момент нужна для решения конкретной проблемы;

7) задачи нейросетевого обоснования управляющих решений, связанных с трудовым потенциалом. Такое обоснование может основываться на формируемых автоматически и используемых ассоциативных моделях объектов наблюдения и самих систем управления.

8) задачи создания нейросетевых когнитивных ассистентов лиц, принимающих решения по управлению трудовым потенциалом РХК;

9) задачи подготовки кадров с применением нейросетевых технологий;

10) задачи повышения производительности и безопасности труда в РХК с применением методов искусственного интеллекта на основе нейронных сетей и другие.

Решение этих задач с применением искусственных нейронных сетей предусматривает необходимость определения, что должно быть на входе нейронной сети и что ожидается на ее выходе. Исходные сигналы перед подачей в нейронную сеть должны быть разложены на составляющие. В качестве таких составляющих могут выступать пространственные, частотные, временные, амплитудные, а также комплексные составляющие, например, пространственно-частотные, амплитудно-частотные и другие. При этом каждая составляющая при необходимости может преобразовываться в последовательность единичных импульсов с частотой и фазой, как функциями от исходных параметров составляющей. С учетом того, что планируется на входе и выходе нейронной сети, а

также, исходя из подхода к ее обучению и запоминанию сигналов, определяются возможные архитектуры сети. Различают нейронные сети, обучаемые с учителем и без учителя (обучение с подкреплением - нейролингвистическое программирование, и обучение на основе самоорганизации). Обработка сигналов может осуществляться, как рекуррентными нейронными сетями, так и сетями прямого распространения. При синтезе необходимой нейронной сети для решения конкретной прикладной задачи могут определяться количество слоев и число входящих в слои нейронов, их функции активации, а также веса синапсов. При синтезе нейронных сетей стремятся минимизировать ошибки в выходных результатах. Для обучения нейронных сетей применяют специальные методы [15-18]. После обучения нейронных сетей в ряде случаев все или часть значений весов синапсов может закрепляться. При незакрепленных значениях весов синапсов нейронные сети в процессе своего функционирования непрерывно обучаются.

Гибридные методы искусственного интеллекта, предусматривающие как обработку знаний на уровне символов, так и обработку сигналов искусственными нейронными сетями, позволяют получить более эффективные результаты в управлении трудовым потенциалом РХК [14,16]. Если с применением методов искусственного интеллекта на основе символической обработки знаний в какой-то мере все прозрачно, то с нейронными сетями многие вопросы остаются открытыми.

Заметим, что основные преимущества решения задач управления трудовым потенциалом РХК с применением искусственных нейронных сетей могут проявляться в расширенных возможностях:

- моделирования трудно формализуемых творческих процессов, для которых слабо применимы традиционные методы;
- автоматического с высокой точностью распознавания сложных статических и динамических образов, процессов, включая речь;
- прогнозирования сложных нечетких зашумленных процессов с изменяющимися законами поведения;
- управления различными системами и процессами в условиях высокой неопределенности внутренней и внешней среды;
- по параллельной высокоскоростной обработке больших объемов данных;

- по обеспечению устойчивости обработки сигналов при сбоях отдельных элементов нейронных сетей и др.

Заключение

Трудовой потенциал рыбохозяйственного комплекса является сложным объектом моделирования, испытывающим влияние средовых изменений, таких как условия труда, организационная структура и правила, взаимодействие акторов в коллективе, особенности формирования стимулов к труду, воздействие других практик менеджмента. Все эти аспекты становятся управляющими воздействиями, которые изменяют трудовой потенциал и влияют на результативность и продуктивность труда. Моделирование трудового потенциала в классической парадигме становится весьма затруднительным. В связи с этим требуется разработка новых подходов, охватывающих многомодельный подход и мягкие вычислительные методы.

Применение подхода, основанного на алгоритмах слабого искусственного интеллекта, видится авторами перспективным в вопросах управления трудовым потенциалом в целом и рыбохозяйственного комплекса, в частности. В связи с этим, целесообразно сконцентрировать усилия прикладной отраслевой науки, решающей задачи управления экономикой отрасли и трудовыми ресурсами, на внедрении механизмов искусственных нейронных сетей в системы и платформы поддержки принятия решений.

При анализе процесса управления трудовым потенциалом РХК предложена одна из возможных его динамических моделей в пространстве состояний. Эта модель может быть использована для определения целевых функций ряда задач управления трудовым потенциалом с использованием искусственных нейронных сетей. Поскольку управление трудовым потенциалом РХК предполагает решение многих трудно формализуемых творческих задач, традиционные методы искусственного интеллекта на основе обработки знаний (символов) во многом не могут обеспечить должный уровень их решения. Применение искусственных нейронных сетей позволит устранить эту проблему.

Литература

1. Ромашевская Н.М., Мигранова Л.А., Токсандаева М.С. Человеческий и трудовой потенциал российских регионов. Народонаселение. 2014. Vol. 3, № 65. P. 106-119.
2. Патутина Е.С. Основные подходы к трактовке понятий «трудового потенциала» и «человеческого потенциала» как основы качества рабочей силы в трудах отечественных и зарубежных ученых. НАУКА. ИССЛЕДОВАНИЯ. ПРАКТИКА. Сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. 2020. P. 215-220.
3. Огий О.Г., Тристанов А.Б. Методологическая база исследования трудового потенциала региона. Материалы VII Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. Калининград: БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. P. 722-726.
4. Шкуркин А.М. Потенциал труда территории: учеб. пособие. М.: Литагент Флинта, 2012.
5. Human resources management: concepts, methodologies, tools, and applications. Pennsylvania: IGI Global, 2012. 1513 p.
6. Turner J.H. Theoretical Sociology. SAGE Publications, 2014.
7. Melnik R. Mathematical and computational modeling: with applications in natural and social sciences, engineering, and the arts.
8. Lave C.A., March J.G. An introduction to models in the social sciences. Lanham: University Press of America, 1993.

9. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189-206.
10. Edling C.R. Mathematics in Sociology. Annual Review of Sociology. 2002. Vol. 28, № 1. P. 197-220.
11. Пейдж С. Модельное мышление. Как анализировать сложные явления с помощью математических моделей. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2020.
12. Page S.E. What Sociologists Should Know About Complexity. Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2015. Vol. 41, № 1. P. 21-41.
13. Miller J.H., Page S.E. Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life. Princeton University Press, 2007. 263 p.
14. Masum A.-K. et al. Intelligent Human Resource Information System (i-HRIS): A Holistic Decision Support Framework for HR Excellence. The International Arab Journal of Information Technology. 2018. Vol. 15, № 1. P. 121-130.
15. Seelen W. V., Behren K. Principles of Neural Information Processing. Springer, 2016.
16. Haykin S. Neural networks and learning machines. Third Ed. New-York: Prentice Hall, 208AD.
17. Marwala T., Hurwitz E. Advanced Information and Knowledge Processing Artificial Intelligence and Economic Theory: Skynet in the Market.
18. Gogas P., Papadimitriou T. Machine Learning in Economics and Finance. Computational Economics. Springer, 2021. Vol. 57, № 1.

References

1. Romashevskaya N.M., Migranova L.A., Toksandaeva M.S. Cheloveveskiy i trudovoy potentsial rossiyskikh regionov [Human and labor potential of Russian regions]. Narodonaselenie. 2014. Vol. 3, № 65. P. 106-119
2. Patutina E.S. Osnovnye podkhody k traktovke ponyatiy «trudovogo potentsiala» i «chelovecheskogo potentsiala» kak osnovy kachestva rabochey sily v trudakh otechestvennykh i zarubezhnykh uchenykh [The main approaches to the interpretation of the concepts of "labor potential" and "human potential" as the basis of the quality of labor force in the works of domestic and foreign scientists]. NAUKA. ISSLEDOVANIYa. PRAKTIKA. Sbornik izbrannykh statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. 2020. P. 215-220.
3. Ogiy O.G., Tristanov A.B. Metodologicheskaya baza issledovaniya trudovogo potentsiala regiona [Methodological basis for the study of the labor potential of the region] Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6-ti tomakh. Kaliningrad: BGARF FGBOU VO "KGTU," 2019. P. 722-726.
4. Shkurkin A.M. Potentsial truda territorii: ucheb. posobie [The labor potential of the territory: textbook]. M.: Litagent Flinta, 2012.
5. Human resources management: concepts, methodologies, tools, and applications. Pennsylvania: IGI Global, 2012. 1513 p.
6. Turner J.H. Theoretical Sociology. SAGE Publications, 2014.
7. Melnik R. Mathematical and computational modeling: with applications in natural and social sciences, engineering, and the arts.
8. Lave C.A., March J.G. An introduction to models in the social sciences. Lanham: University Press of America, 1993.
9. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189-206.
10. Edling C.R. Mathematics in Sociology. Annual Review of Sociology. 2002. Vol. 28, № 1. P. 197-220.
11. Peydzh S. Model'noe myshlenie. Kak analizirovat' slozhnye yavleniya s pomoshch'yu matematicheskikh modeley. [Model thinking. How to analyze complex phenomena using mathematical models] M.: Mann, Ivanov i Ferber, 2020.
12. Page S.E. What Sociologists Should Know About Complexity. Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2015. Vol. 41, № 1. P. 21-41.
13. Miller J.H., Page S.E. Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life. Princeton University Press, 2007. 263 p.
14. Masum A.-K. et al. Intelligent Human Resource Information System (i-HRIS): A Holistic Decision Support Framework for HR Excellence. The International Arab Journal of Information Technology. 2018. Vol. 15, № 1. P. 121-130.
15. Seelen W. V., Behren K. Principles of Neural Information Processing. Springer, 2016.
16. Haykin S. Neural networks and learning machines. Third Ed. New-York: Prentice Hall, 208AD.
17. Marwala T., Hurwitz E. Advanced Information and Knowledge Processing Artificial Intelligence and Economic Theory: Skynet in the Market.
18. Gogas P., Papadimitriou T. Machine Learning in Economics and Finance. Computational Economics. Springer, 2021. Vol. 57, № 1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Оксана Геннадьевна Огий, кандидат социологических наук, доцент, первый проректор, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, Россия, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru

Oksana G. Ogij, Ph.D. (Social), Assistant Professor, First Vice-Rector, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Василий Юрьевич Осипов, доктор технических наук, профессор, и.о. директора СПИИРАН СПб ФИЦ РАН, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом 39, e-mail: osipov.v@ias.spb.su

Александр Борисович Тристанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, Россия, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Наталья Александровна Жукова, доктор технических наук, доцент; старший научный сотрудник, СПб ФИЦ РАН; 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом 39, e-mail: nazhukova@mail.ru

Vasiliy Y. Osipov, Dr.Sci. (Eng), Professor; Director SPIIRAS St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14-th Linia, VI, No. 39, St. Petersburg, 199178, Russia

Alexander B. Tristanov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, head of applied math and information technology department, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Natalia A. Zhukova, Dr.Sci. (Eng), Assistant Professor; Senior Researcher; St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14-th Linia, VI, No. 39, St. Petersburg, 199178, Russia e-mail: nazhukova@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021

Принята к публикации: 15.08.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 517.912:621.516:639.2.061

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.031>

Особенности гидравлического расчета судовых вакуумных рыбонасосных установок

Н.Р. Ахмедова¹ e-mail: isfendi@mail.ru, В.А. Наумов¹ e-mail: van-old@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Цель статьи – модифицировать ранее разработанный метод гидравлического расчета вакуумной перекачивающей системы для течения в рыбонасосной установке, работающей на промысловом судне. Динамика откачивания и закачивания воздуха в буферную емкость не изменилась. Анализ экспериментальных данных показал, что гидравлические потери по длине трубопровода прямо пропорциональны величине массовой доли рыбы. В судовых условиях потери напора в местных гидравлических сопротивлениях могут иметь тот же порядок, что и потери по длине. В отличие от традиционных судовых систем течение жидкости в вакуумных рыбонасосных установках (ВРУ) является нестационарным из-за увеличения давления в буферной емкости, как на этапе всасывания, так и на этапе вытеснения. Что приводит к необходимости совместного решения уравнения Бернулли для нестационарных течений совместно с дифференциальными уравнениями для давления и объема жидкости в буферной емкости. Увеличение длины трубопровода или перепада высот приводит к снижению скорости движения водорыбной смеси и увеличению давления в буферной емкости. Как следствие, возрастает продолжительность цикла работы ВРУ и падает производительность.

Ключевые слова: судовые вакуумные рыбонасосные установки, математическая модель, потери напора, гидравлический расчет, нестационарное течение, скорость, давление.

Features of hydraulic calculation of marine vacuum fish pumping units

Natalia R. Akhmedova¹ e-mail: isfendi@mail.ru, Vladimir A. Naumov¹ e-mail: van-old@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The purpose of the article is to modify a previously developed method of hydraulic calculation of a vacuum pumping system for a flow in a fish pump unit operating on a fishing vessel. The dynamics of pumping out and pumping air into the buffer tank did not change. Analysis of experimental data showed that hydraulic losses along the length of the pipeline are directly proportional to the value of the mass fraction of fish. In shipboard conditions, head losses in local hydraulic resistances can be of the same order as length losses. In contrast to traditional ship systems, the fluid flow in vacuum fish pumping units (VFP) is unsteady due to an increase in pressure in the buffer tank, both at the stage of suction and at the stage of displacement. This leads to the need of jointly solve the Bernoulli equation for unsteady flows together with differential equations for the pressure and volume of fluid in the buffer tank. An increase in the length of the pipeline or the height difference leads to a decrease in the speed of movement of the water-fish mixture and an increase in pressure in the buffer tank. As a result, the duration of the VFP operation cycle increases and the productivity decreases.

Key words: marine vacuum fish pumping units, mathematical model, pressure loss, hydraulic calculation, unsteady flow, speed, pressure.

Введение

Трубопроводные сети играют важную роль в функционировании судовых систем (СС). Поэтому их изучению и совершенствованию посвящено большое количество исследований (см. [1-3] и библиографию в них). Проектирование судовых трубопроводных систем предусматривает их гидравлический расчет. Методы гидравлического расчета традиционных СС можно считать достаточно хорошо разработанными, они нашли свое отражение в научных и учебно-методических изданиях [4-6]. Не смотря на разнообразие СС, методы расчета объединяет использование определенного типа насоса для перемещения жидкостей, иная ситуация с вакуумными рыбонасосными установками (ВРУ).

ВРУ на базе водокольцевых компрессорных машин (ВКМ) работают в два этапа. На первом этапе ВКМ в режиме вакуумного насоса откачивает воздух из буферной емкости (БЕ), после чего водорыбная смесь (ВРС) засасывается в эту емкость. На втором этапе ВКМ в режиме компрессора вытесняет ВРС из БЕ. ВРУ, установленные на промысловых судах, используются как для транспортировки рыбы из

орудия лова в рефрижераторные хранилища, так и из них на береговые перерабатывающие предприятия [7-9]. На рис. 1 представлена схема ВРУ на базе ВКМ Ocean Master (ОМ), которые компания Samson Pumps (Дания) [9] устанавливает на рыболовных судах. Минимальное абсолютное давление, которое может создавать в ВКМ ОМ-1000, $P_v = 6,5$ кПа, максимальное – 400 кПа.

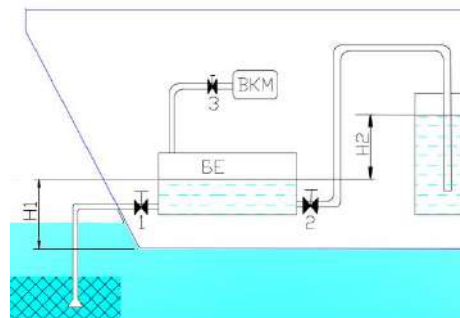


Рис. 1. Схема ВРУ, устанавливаемых компанией Samson Pumps на рыболовных судах [9]

В [10-12] была разработана математическая модель этапов работы ВРУ. При этом главное внимание было уделено моделированию процессов откачки и закачки воздуха в БЕ с помощью ВКМ. Было установлено, что давление в БЕ в конце первой фазы этапа всасывания P_0 , зависит не только от P_V , но и от коэффициента утечки k , времени работы ВКМ и объема БЕ V_0 .

Для гидравлического расчета всасывающего и нагнетательного трубопровода в [10-12] было применено уравнение Бернулли. Так как перепад давления во время работы падает, был учтен нестационарный характер течения ВРС. Гидравлические потери по длине трубопровода Δh_L рассчитывались методом [13], который использует излишне усложненные эмпирические формулы А.Л. Фонарева [14, 15], не учитывающие низкую точность исходных экспериментальных данных. Местные гидравлические потери Σh_M [10-12] учитывались, как при проектировании длинного трубопровода: $\Sigma h_M = 0,1 \cdot \Sigma h_L$, тогда как в судовом трубопроводе величина Σh_M может быть много большей.

В данной статье рассмотрены особенности гидравлического расчета течения ВРС в трубопроводе судовых ВРУ.

1. Расчет гидравлических потерь

Формулы, предложенные в работах А.Л. Фонарева [14,15] для расчета гидравлических потерь по длине трубопровода, содержат многочисленные эмпирические условия и коэффициенты. Последние заметно отличаются для разных видов рыбы, зависят от точности результатов экспериментальных исследований трения при течении ВРС. Так в [14,15] предложено пренебречь влиянием ВРС на гидравлическое сопротивление, если массовая доля рыбы $\Theta < 0,2$. Попробуем более внимательно проанализировать результаты обширных экспериментальных исследований, выполненных в [14] при трех значения Θ (0,2; 0,3; 0,4). На рис. 2 точками показаны экспериментальные данные, полученные при гидротранспорте ставриды по резиноканевому рукаву.

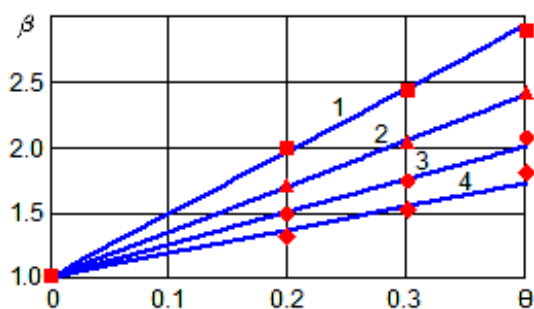


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлических потерь от массовой доли рыбы: 1 – $Re \cdot 10^{-5} = 1,97$; 2 – 2,30; 3 – 2,63; 4 – 2,96. Точки – опытные данные [14], линии – расчет по формуле (2)

Здесь и далее используются обозначения (1):

$$\beta = \frac{\lambda}{\lambda_0}, \lambda_0 = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, Re = \frac{\rho \cdot W \cdot d}{\mu}, \quad (1)$$

где λ , λ_0 – коэффициент гидравлических потерь по длине трубопровода при течении ВРС и воды,

соответственно; Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость трубы; d – внутренний диаметр трубы (рукава); Re – число Рейнольдса; ρ , μ – плотность и динамическая вязкость воды, соответственно.

Относительный коэффициент гидравлических потерь β можно считать прямо пропорциональным величине Θ с коэффициентом пропорциональности, зависящим от вида рыбы F и числа Рейнольдса (2):

$$\beta = B \cdot \Theta, \quad B = f_F(Re). \quad (2)$$

Вид зависимости $f_F(Re)$ для гидротранспорта ставриды показан на рис. 3, на котором линия – результат расчета по формуле $B = B_0/Re^\alpha$ ($B_0=16,54$; $\alpha=2$).

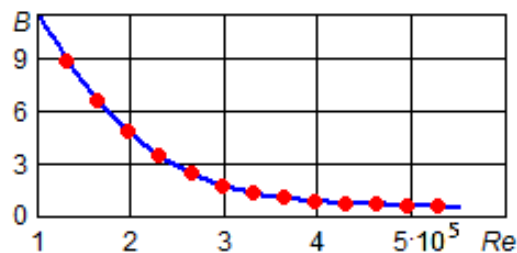


Рис. 3. Коэффициент пропорциональности в формуле (2) для гидротранспорта ставриды по резиноканевому рукаву. Точки – опытные данные [14]

При использовании формул (1), (2) индекс детерминации по всему массиву данных [14] $R^2 = 0,97$; относительная погрешность аппроксимации не превышает 4%. Такой результат представляется вполне удовлетворительным, так как погрешность косвенных измерений в [14] достигает 5-7%.

В первом приближении будем полагать, что потери напора при течении ВРС в местных гидравлических сопротивлениях возрастают так же, как по длине трубопровода, тогда сумму потерь можно рассчитать по приближенной формуле (3):

$$\Sigma h = \beta \cdot \left(\lambda_0 \frac{L}{d} + \zeta_0 \right) \cdot \frac{W^2}{2g}, \quad (3)$$

где L – длина трубопровода (рукава), ζ_0 – суммарный коэффициент местных потерь при течении воды, g – ускорение свободного падения.

2. Математическая модель

В процессе перекачивания ВРС давление в БЕ растет, поэтому течение в трубопроводе и на первом, и на втором этапе является нестационарным. Течение описывается уравнением Бернулли (4) [10]:

$$L_j \frac{dW}{dt} = \frac{\Delta P_j}{\rho} - g \cdot H_j - (\Sigma h)_j, \quad W(0) = 0, \quad (4)$$

где $j = 1; 2$ – номер этапа; t – время от начала этапа; P – абсолютное давление в БЕ; P_A – атмосферное давление; ΔP_j – перепад давлений по формуле (5):

$$\Delta P_1(t) = P_A - P(t), \quad \Delta P_2(t) = P(t) - P_A. \quad (5)$$

Уровень поверхности моря и ВРС в рефрижераторной емкости в отдельном цикле работы ВРУ можно считать неизменными (см. рис. 1).

Поэтому текущий перепад уровней H_j , в отличие от [11, 12], рассчитывался по формуле (6):

$$H_j(t) = H_j(0) + V(t) / S_0, \quad (6)$$

где S_0 – площадь горизонтального сечения БЕ.

Другая важная особенность гидравлического расчета ВРУ в том, что математическое описание процесса, кроме (4), включает дифференциальные уравнения для объема ВРС $V(t)$ и давления в БЕ. На втором этапе они имеют вид (7), (8):

$$(V_0 - V) \frac{dP}{dt} = \varphi(P) \cdot ((1 - k)P + kP_A) - Q_2 P, \quad (7)$$

$$\frac{dV}{dt} = -Q_2, \quad Q_2 = S_2 W, \quad P(0) = P_B, \quad V(0) = V_B, \quad (8)$$

где k – коэффициент утечки воздуха, S_2 – площадь поперечного сечения нагнетательного трубопровода, $\varphi(P)$ – зависимость эффективной производительности ВКМ в режиме воздуходувки от давления в БЕ, V_B – объем ВРС, перекачиваемый за один цикл, P_B – давление в БЕ, при котором завершается этап всасывания и начинается второй этап.

Величины V_B , P_B находились из системы алгебраических уравнений (9), записанных в предположении, что процессы сжатия и расширения воздуха в БЕ являются изотермическими:

$$(V_0 - V_B) \cdot P_B = P_0 V_0, \quad P_A = P_B + \rho_F g (H_1(0) + V_B / S_0), \quad (9)$$

где ρ_F – плотность ВРС.

В [16] было показано, что эффективная производительность (подача) водокольцевого компрессора G может быть рассчитана по формуле (10):

$$G \equiv \varphi(P, n) = G_A(n) + K(n) \cdot (P - P_A), \quad (10)$$

где G_A , K зависят от марки ВКМ и частоты вращения ротора n , определяются по результатам испытаний.

3. Результаты и обсуждение

Задача Коши (4), (7), (8) решалась численным методом в среде Mathcad с использованием характеристик ВКМ Samson KS625, полученных в [16] при $n = 1400$ об/мин. В расчетах параметры БЕ и всасывающего трубопровода полагались постоянными: $\Theta = 0,3$; $V_0 = 4 \text{ м}^3$; $d = 0,3 \text{ м}$; $k = 0,05$; $L_1 = 20 \text{ м}$; $H_1(0) = 4 \text{ м}$; $S_0 = 2 \text{ м}^2$; $P_0 = 19,45 \text{ кПа}$. Тогда из системы уравнений (9) получаются значения параметров $V_B = 2,42 \text{ м}^3$; $P_B = 49,13 \text{ кПа}$.

Был выполнен гидравлический расчет при $H_2(0) = 4 \text{ м}$ и разных значениях длины нагнетательного трубопровода ВРУ L_2 . При этом полагалось, что на каждые 10 м трубопровода приходится один поворот на 90° . На рис. 3, 4 представлены результаты расчета скорости ВРС в трубопроводе и давления в БЕ на втором этапе работы ВРУ. Видно, что пренебречь нестационарным характером течения нельзя.

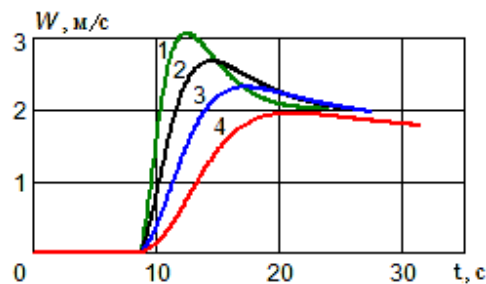


Рис. 4. Изменение скорости в нагнетательном трубопроводе при различной его длине: 1 – $L_2 = 20 \text{ м}$; 2 – 40 м ; 3 – 80 м ; 4 – 160 м

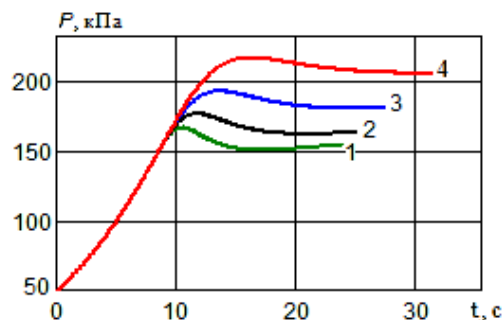


Рис. 5. Изменение давления в БЕ на втором этапе при разных L_2 . Обозначения, как на рис. 4

С увеличением длины трубопровода растет гидравлическое сопротивление, поэтому падает скорость движения ВРС и возрастает продолжительность второго этапа с 23,9 секунд до 31,5. Последнее ведет к снижению производительности ВРУ, так как объем V_B не зависит от параметров нагнетательного трубопровода и в данных расчетах оставался неизменным.

На рис. 6 и 7 представлены результаты гидравлического расчета при $L_2 = 20 \text{ м}$ и разных значениях перепада высот нагнетательного трубопровода. Чем больше величина $H_2(0)$, тем до большего значения нужно поднять давление в БЕ, чтобы началось вытеснение ВРС. При $H_2(0) = 1 \text{ м}$ необходимо давление 123,4 Па, при $H_2(0) = 10 \text{ м}$ заметно выше – 189,3 Па. В первом случае максимум скорости равен 2,81 м/с, он достигается через 12,8 с после начала второго этапа; во втором – 2,18 м/с через 17,3 с. На фазу закачивания воздуха в БЕ и весь второй этап затрачивается больше времени.

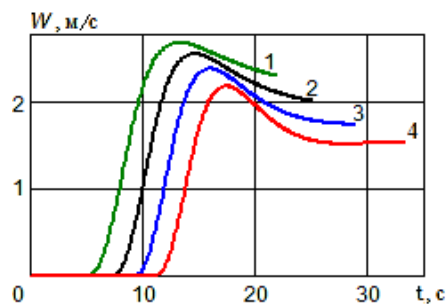


Рис. 6. Изменение скорости в нагнетательном трубопроводе при различных перепадах уровней: 1 – $H_2(0) = 1 \text{ м}$; 2 – 4 м ; 3 – 7 м ; 4 – 10 м

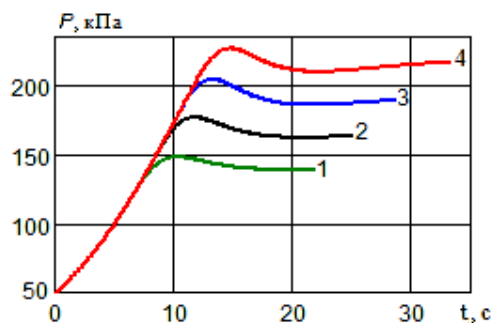


Рис. 7. Изменение давления в БЕ на втором этапе при разных H_2 . Обозначения, как на рис. 6

В первом случае продолжительность второго этапа составила 21,9 с при максимальном давлении в БЕ 147,9 кПа, во втором случае – 33,3 с при 226,4 кПа.

По методике [10-12] были рассчитаны подача ВРС за полный цикл работы Q , КПД ВРУ η и показатель энергоёмкости E при изменении $H_2(0)$ (см. табл.).

Таблица
Показатели ВРУ на базе ВКМ Samson KS625 ($n = 1400$ об/мин)

$H_2(0)$, м	T , с	Q , $\text{дм}^3/\text{с}$	η , %	E , $\text{кДж}/\text{м}^3$
1	84,9	28,4	18,9	589,4
4	88,2	27,4	21,6	631,9
7	91,9	26,3	23,5	684,1
10	96,4	25,1	24,7	748,5

Заключение

Гидравлический расчет течений в вакуумных рыбоасосных установках имеет важные

особенности, игнорирование которых приводит к заметным ошибкам. Анализ экспериментальных данных позволяет считать гидравлические потери на трение по длине трубопровода прямо пропорциональными величине массовой доли рыбы в транспортируемой смеси. Коэффициент пропорциональности зависит от вида рыбы. В судовых условиях потери напора в местных гидравлических сопротивлениях могут иметь тот же порядок, что и потери по длине.

В отличие от традиционных судовых систем течение жидкости в вакуумных рыбоасосных установках является нестационарным из-за увеличения давления в буферной емкости, как на этапе всасывания, так и на этапе вытеснения водорыбной смеси, что приводит к необходимости совместного решения уравнения Бернулли для медленно меняющихся нестационарных течений совместно с дифференциальными уравнениями для давления и объема жидкости в буферной емкости.

Увеличение длины трубопровода или перепада высот приводит к снижению скорости движения водорыбной смеси и увеличению давления в буферной емкости. Как следствие, возрастает продолжительность цикла работы ВРУ и падает производительность.

Расчеты показали, что при увеличении начального перепада высот нагнетания растет КПД установки, рассчитываемый традиционным методом по отношению полезной работы к затраченной, однако оценивать энергетическую эффективность ВРУ следует по показателю энергетической емкости E . С ростом $H_2(0)$ этот показатель ухудшается.

Литература

1. Нго Ж.В., Сахно К.Н. Исследование компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов судовых систем // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 1. С. 157–164.
2. Wang Y.L., Yu Y.Y., Li K., Zhao X., Guan G. A human-computer cooperation improved ant colony optimization for ship pipe route design. Ocean Engineering. 2018. V. 150. P. 12–20.
3. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system. ISA Transactions. 2019. V. 92. P. 228-240.
4. Пшеницын А.А. Гидравлический расчет судовой системы: учебное пособие. Северодвинск: Севмашвуз, 2008. 40 с.
5. Pérez D., Torres A. Ramos Arzola L. The computational simulation in the design of ship piping systems. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2017. V. 38. No. 2. P. 29-43.
6. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Тришина А.В. Нагрузочные характеристики трехплунжерных насосов для пожаротушения распыленной морской водой // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4, Т.2. С. 142-146.
7. Кудакеев В.В., Карпелев Т.П., Бойцов А.Н. Автоматизированные гидравлические системы транспортировки рыбы из орудий лова рыбоасосами // Известия ТИИРО. 2016. Т. 186. С. 207–213.
8. Колесников П. Автоматизированная установка для транспортировки рыбы // Автоматизация и производство. 2020. № 2. С. 18-19.
9. Samson Pumps. Ocean Master Series [Electronic resource]. URL: www.samson-pumps.com/applications/ocean-master-series/ (accessed 15.04.2021).
10. Наумов В.А., Великанов Н.Л. Этапы работы вакуумной рыбоасосной установки // Рыбное хозяйство. 2020. № 2. С. 108–112.
11. Naumov V.A. Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 862 032007.
12. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Землянов А.А. Производительность вакуумных рыбоасосных установок большой мощности // Рыбное хозяйство. 2020. № 4. С. 119-123.
13. Наумов В.А. Инженерный метод расчета коэффициента гидравлических потерь при транспортировании водорыбной смеси по трубам // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. Т. 6, № 1. С. 20-28.

14. Фонарев А.Л. Технические указания по расчету горизонтального гидравлического транспорта рыбы и его технических средств. Москва: ВНИРО, 1977. 29 с.
15. Фонарев А.Л. Гидравлика и гидравлические машины в промышленном рыболовстве: учебник. М.: Колос, 1993. 168 с.
16. Наумов В. А. Влияние частоты вращения ротора водокольцевых компрессорных машин на перекачивание воздуха // Известия КГТУ. 2021. № 60. С. 111-122.

References

1. Ngo Zh.V., Sakhno K.N. (2017) Issledovanie kompensacionnyh vozmozhnostej proektnoj trassirovki truboprovodov sudovyh system [The study of compensatory possibilities of routing pipelines project of ship systems]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. V. 9. No. 1, pp. 157–164.
2. Wang Y.L., Yu Y.Y., Li K., Zhao X., Guan G. (2018) A human-computer cooperation improved ant colony optimization for ship pipe route design. Ocean Engineering. V. 150, pp. 12–20.
3. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. (2019) Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system. ISA Transactions. V. 92, pp. 228-240.
4. Pshenicyn A.A. Gidravlicheskiy raschet sudovoy sistemy: uchebnoe posobie [Hydraulic calculation of the ship system: a textbook]. Severodvinsk: Sevmashvtuz, 2008. 40 s.
5. Pérez D., Torres A. Ramos Arzola L. (2017) The computational simulation in the design of ship piping systems. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. V. 38. No. 2, pp. 29-43.
6. Naumov V.A., Velikanov N.L., Trishina A.V. (2020) Nagruzochnye karakteristiki trekhplunzhernykh nasosov dlya pozharotusheniya raspylennoj morskoy vodoj [Load characteristics of three-plunger pumps for spray seawater firefighting]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. No. 4, V.2, pp. 142-146.
7. Kudakaev V.V., Karpelev T.P., Bojcov A.N. (2016) Avtomatizirovannyye gidravlicheskie sistemy transportirovki ryby iz orudij lova rybonasosami [Automated hydraulic systems for transporting fish from fishing gear with fish pumps]. Izvestiya TINRO. V. 186, pp. 207-213.
8. Kolesnikov P. (2020) Avtomatizirovannaya ustanovka dlya transportirovki ryby // Avtomatizatsiya i proizvodstvo [Automated installation for fish transportation]. No. 2, pp. 18-19.
9. Samson Pumps. Ocean Master Series [Electronic resource]. URL: www.samson-pumps.com/applications/ocean-master-series/ (accessed 15.04.2021).
10. Naumov V.A., Velikanov N.L. (2020) Etapy raboty vakuumnoy rybonasosnoj ustanovki [Stages of operation of a vacuum fish-pumping unit]. Rybnoe khozyajstvo. No. 2, pp. 108–112.
11. Naumov V.A. (2020) Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 862 032007.
12. Naumov V.A., Velikanov N.L., Zemlyanov A.A. (2020) Proizvoditel'nost' vakuumnykh rybonasosnykh ustanovok bol'shoj moshchnosti [Productivity of vacuum fish-pumping installations of high power]. Rybnoe khozyajstvo. No. 4. pp. 119-123.
13. Naumov V.A. (2020) Inzhenernyj metod rascheta koeffitsienta gidravlicheskih poter' pri transportirovaniy vodorybnoy smesi po trubam [Engineering method for calculating the coefficient of hydraulic losses during the transportation of a water-fish mixture through pipes]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. V. 6, No. 1, pp. 20-28.
14. Fonarev A.L. Tekhnicheskie ukazaniya po raschetu gorizontalnogo gidravlicheskogo transporta ryby i ego tekhnicheskikh sredstv [Technical instructions for calculating the horizontal hydraulic transport of fish and its technical means]. Moscow: VNIRO, 1977. 29 s.
15. Fonarev A.L. Gidravlika i gidravlicheskie mashiny v promyshlennom rybolovstve: uchebnik [Hydraulics and hydraulic machines in industrial fishing: textbook]. Moscow: Kolos, 1993. 168 s.
16. Naumov V. A. (2021) Vliyaniye chastoty vrashcheniya rotora vodokol'tsevykh kompressornykh mashin na perekachivaniye vozduha [Influence of the rotor rotation frequency of water-ring compressor machines on air pumping]. Izvestiya KGTU. No. 60, pp. 111-122.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наталья Равиловна Ахмедова, кандидат биологических наук, доцент кафедры водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: isfendi@mail.ru

Natalya R. Akhmedova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of The Water Resources & Water Use Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: isfendi@mail.ru

Владимир Аркадьевич Наумов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: van-old@mail.ru

Vladimir A. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of The Water Resources & Water Use Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: van-old@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.05.2021
Принята к публикации: 12.08.2021

УДК 531.391.1:532.5.011

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.032>

Математическое моделирование подводной укладки кабеля с учетом действия неоднородной гидростатической силы в условиях Арктического бассейна

И.А. Керестень¹ e-mail: keresten@compmechlab.com, И.А. Попов¹ e-mail: popov_ia@spbstu.ru,
М.В. Ховайко¹ e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Статья посвящена моделированию динамического равновесия установившегося движения протяженной кабельной линии с учетом действия гидродинамических сил сопротивления и неоднородной гидростатической силы. Учитывая различные условия и глубины укладки, а также требования функционального назначения и защиты от враждебных факторов морского дна, необходимо рассмотреть широкий диапазон кабелей с различными механическими характеристиками: трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA, одножильный кабель с одиночным бронированием ZS-YJQ41 и одножильный кабель с двойным бронированием – аналог GASLMLTV.

Целью работы является развитие цифровой технологии по моделированию укладки подводных коммуникационных и силовых кабелей, позволяющей учитывать многочисленные физико-механические явления, имеющие место при проведении реальных морских работ. Для достижения поставленной цели работы используется программная среда Matlab Math Works с использованием разработанного комплекса программ для инженерной оценки формы и натяжения провисающего участка кабеля.

Научная новизна состоит в апробации модели подводной укладки кабеля, учитывающей действие неоднородной гидростатической силы. Результаты моделирования представлены в виде формы и натяжения провисающей части кабеля при различных углах схода кабеля с движущегося судна при различных механических параметрах кабелей. Практическое значение работы состоит в повышении эффективности освоения перспективных месторождений, путем определения характеристик укладки кабеля в условиях Арктического бассейна: газовое месторождение Лудловское, газоконденсатное месторождение Ленинградское, нефтяное месторождение Медыньское-море.

Ключевые слова: Задача Рауса-Аппеля, укладка кабеля, силовой подводный кабель, механика кабеля, неоднородная гидростатическая сила, гидродинамические силы сопротивления, компьютерный инжиниринг, математическое моделирование.

Numerical simulation of underwater cable laying with account of non-uniform hydrostatic force at Arctic basin condition

Ilya A. Keresten¹ e-mail: keresten@compmechlab.com, Ivan A. Popov¹ e-mail: popov_ia@spbstu.ru,
Mikhail V. Khovaiko¹ e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article studies the numerical simulation of underwater steady motion of the cable line with account of hydrodynamic water resistance forces and non-uniform hydrostatic force. It is necessary to consider distinctive types of cables due to various depths, laying conditions, functional requirements and protection requirements against adverse factors of seabed. Three-core single armoured cable 2XS2YRAA, one-core single armoured cable ZS-YJQ41 and one-core double armoured cable – analogue GASLMLTV are considered in this article.

The aim of the research consists in digital technology development for underwater cable laying modeling, which allows taking into account numerous physical and mechanical features. These features occur during real marine operations for communication and power cables. Programming and numeric computing platform Matlab Math Works with developed software package is chosen as the research method. Simulation results are presented in dimensionless form for cable shape and tension for engineering purposes.

The novelty of the work consists in approbation of underwater cable laying analytical model considering non-uniform hydrostatic force. Simulation results are presented for underwater cable laying during reeling from spool mounted on the vessel, moving with constant speed for distinctive types of cables. The influence of the cable run-off angle on the investigated characteristics was also considered. The practical value of the research consists in increasing of efficiency of exploration of oil, gas and condensate fields by determining underwater cable laying characteristics for perspective fields. At the end of the paper, the results of estimation of the shape and tension of the cable being laid undersea were presented for several fields at Arctic basin condition: gas field Ludlovskoe, condensate field Leningradskoe and oil field Medinskoe sea.

Key words: Routh-Appel problem, cable laying, power submarine cable, cable mechanics, non-uniform hydrostatic force, hydrodynamic resistance forces, computer engineering, numerical simulation.

Введение

Возрастающие потребности в энергоносителях, в условиях стабилизации и дальнейшего падения добычи нефти и газа на суше требуют более широкого освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа. В связи с этим, освоение

углеводородных ресурсов континентального шельфа является приоритетным и перспективным направлением научно-технического развития Российской Федерации в части удержания лидирующих позиций в освоении и использовании Арктики (Указ Президента Российской Федерации от 01 декабря 2016 г. № 642, п. 20.е). Развитие

цифровой технологии по моделированию подводной укладки кабелей способствует повышению эффективности освоения перспективных месторождений, которыми являются: Лудловское, Ленинградское, Медынское-море.

Лудловское – однопластовое газоконденсатное месторождение, имеющее площадь 242.2 км². Оно является одним из крупнейших разведываемых месторождений Баренцева моря, запасы которого превышают 100 млрд. м³ [1]. Отличается большой глубиной моря в границах месторождения порядка 200-400 м, расстояние от берега – 755 км.

Ленинградское газоконденсатное месторождение – самое крупное по площади месторождение нераспределённого фонда недр акваторий России: по максимальной площади отдельного продуктивного пласта 1180.2 км², по суммарной площади запасов 3001.2 км² [1]. Глубина моря в границах месторождения порядка 80-165 м, расстояние от берега – 125 км.

Медынское-море – крупное нефтяное месторождение, было открыто в 1997 году в южной части Печорского моря. Данное месторождение является частью перспективного Верхневизейско-нижнепермского нефтегазоносного комплекса, Печерского шельфа. Глубина моря в границах месторождения порядка 10-20 м, расстояние от берега – 23 км [2].

Несмотря на существенные объемы ресурсов, за десятилетия со времени открытия, данные месторождения не вызвали серьезного интереса у недропользователей по причине отсутствия в мире апробированных технологий добычи в экстремальных ледовых условиях; необходимости многомиллиардных капитальных вложений в подводное обустройство, учитывая, что подобные технологии пока не апробированы нигде в мире в похожих природно-климатических условиях [3].

Задача об укладке кабеля под водой известна в литературе как задача Рауса-Аппеля. Наиболее современное аналитическое решение этой задачи получено Д.Р. Меркиным в 1980 году в удобном для инженерных расчетов виде [4, 5]. Очень часто при моделировании подводной укладки кабеля используется упрощенный учет действия гидростатической нагрузки – с использованием погонного веса кабеля в воде. Однако в действительности торцы элемента кабеля не смачиваются и поэтому интегральное влияние поверхностной силы гидростатического давления не эквивалентно действию вертикальной силы [6, 7]. В настоящей работе представлена уточненная аналитическая модель задачи Рауса-Аппеля и показано влияние этого эффекта на исследуемые характеристики укладки кабеля.

Описание аналитической модели подводной укладки кабеля

При моделировании укладки кабеля на дно моря часто используется теория механики нити. Выбор такой математической модели обоснован тем, что, во-первых, длина протяженной кабельной линии провисающего участка кабеля значительно превышает размеры поперечного сечения. Во-вторых, жесткость кабельной линии на изгиб, как правило, не оказывает существенного влияния на форму и натяжение провисающего участка кабеля.

Рассмотрим равномерную укладку нерастяжимого кабеля со скоростью \underline{V} (см. рис. 1) на дно моря постоянной глубины H . С течением времени будет наблюдаться установившееся состояние динамического равновесия.

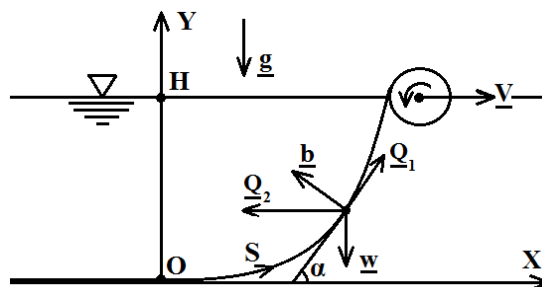


Рис. 1. Постановка задачи

В качестве внешних сил, действующих на провисающий участок кабеля учтем погонный вес кабеля \underline{w} , погонную гидродинамическую силу сопротивления движению установившейся формы провисающего участка кабеля в потоке \underline{Q}_2 , погонную гидродинамическую силу сопротивления движению кабеля вдоль кабельной линии \underline{Q}_1 , погонную неоднородную гидростатическую силу \underline{b} .

Наиболее удобно определить неоднородную гидростатическую силу $\underline{b}ds$, действующую на боковую поверхность элемента кабеля, как разницу между силой Архимеда, действующей на элемент кабеля, и результирующей силой давления воды на торцы элемента кабеля (см. рис. 2). Проекции погонной неоднородной гидростатической силы на касательную b_τ и главную нормаль b_n будут иметь вид [7]:

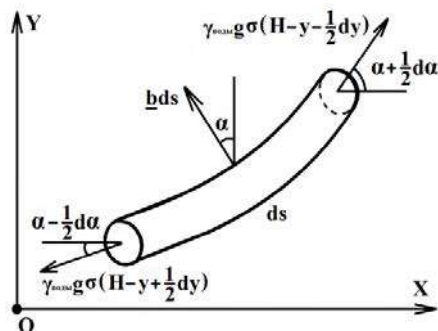


Рис. 2. Гидростатическая сила, действующая на элемент кабеля

$$b_\tau = 0, \quad b_n = \gamma_{\text{воды}} g \sigma \left[\cos \alpha + \frac{(H - y)}{\rho} \right], \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{воды}}$ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, σ – площадь поперечного сечения кабеля, α – угол между касательной τ и ординатой y , ρ – радиус кривизны.

Уравнения контурного плоского движения кабеля вдоль установившейся формы динамического равновесия в естественных координатах имеют вид:

$$\frac{dT^*}{ds} = w \sin \alpha - \lambda_r (1 - \cos \alpha),$$

$$\frac{T^*}{\rho} = (w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha - b \frac{(H - y)}{\rho}, \quad (2)$$

где T^* – кажущееся натяжение кабеля, S – дуговая координата, λ – погонная гидродинамическая сила сопротивления.

Удобно ввести приведенное натяжение кабеля T^{**} и свести систему дифференциальных уравнений (2) к задаче Рауса-Аппеля:

$$T^{**} = T^* + b(H - y),$$

$$\frac{dT^{**}}{ds} = (w - b) \sin \alpha - \lambda_r (1 - \cos \alpha), \quad (3)$$

$$\frac{T^{**}}{\rho} = (w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha.$$

Естественные координаты связаны с прямоугольными координатами следующими соотношениями:

$$\rho = \frac{ds}{d\alpha} = \frac{1}{\cos \alpha} \frac{dx}{d\alpha} = \frac{1}{\sin \alpha} \frac{dy}{d\alpha}. \quad (4)$$

Используя уравнение связи (4), перейдем от системы дифференциальных уравнений записанных в естественных координатах (3) к прямоугольным координатам для определения приведенного натяжения кабеля T^{**} , абсциссы x , ординаты y и дуговой координаты S :

$$\frac{dT^{**}}{d\alpha} = \frac{(w - b) \sin \alpha - \lambda_r (1 - \cos \alpha)}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} T^{**},$$

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{\cos \alpha}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} T^{**},$$

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{\sin \alpha}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} T^{**}, \quad (5)$$

$$\frac{ds}{d\alpha} = \frac{1}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} T^{**}.$$

Для окончательной постановки задачи необходимо задаться областью интегрирования и граничными условиями:

$$x_{\alpha=0} = 0,$$

$$y_{\alpha=0} = 0,$$

$$y_{\alpha=\alpha_{схода}} = H,$$

$$s_{\alpha=0} = 0. \quad (6)$$

Аналитическое решение сформированной задачи Рауса-Аппеля известно и представлено в литературе [4]. Приведем ниже основные и заключительные уравнения для провисающего участка кабеля, дополненные учетом неоднородной гидростатической силы. Дифференциальное

уравнение для приведенного натяжения кабеля T^{**} имеет следующий вид:

$$\frac{dT^{**}}{T^{**}} = \frac{(w - b) \sin \alpha - \lambda_r (1 - \cos \alpha)}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} d\alpha, \quad (7)$$

решением которого в общем виде является:

$$T^{**} = C_1 e^{F(\alpha)},$$

$$F(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{(w - b) \sin \xi - \lambda_r (1 - \cos \xi)}{(w - b) \cos \xi - \lambda_n \sin^2 \xi} d\xi, \quad (8)$$

где угол α измеряется в пределах:

$$\alpha = [0; \alpha_{схода}]. \quad (9)$$

Отметим, что существует верхний предел для угла схода кабеля $\alpha_{схода}$, соответствующий особой точке системы (5). Константа интегрирования C_1 определяется из третьего граничного условия (6):

$$C_1 = \frac{H}{\int_0^{\alpha_{схода}} \frac{e^{F(\alpha)} \sin \alpha}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} d\alpha}. \quad (10)$$

Оставшиеся уравнения для провисающего участка кабеля имеют вид:

$$x = C_1 \int_0^{\alpha_{схода}} \frac{e^{F(\alpha)} \cos \alpha}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} d\alpha,$$

$$y = C_1 \int_0^{\alpha_{схода}} \frac{e^{F(\alpha)} \sin \alpha}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} d\alpha, \quad (11)$$

$$s = C_1 \int_0^{\alpha_{схода}} \frac{e^{F(\alpha)}}{(w - b) \cos \alpha - \lambda_n \sin^2 \alpha} d\alpha.$$

Заключительным шагом является переход от приведенного натяжения кабеля T^{**} к динамическому натяжению кабеля T :

$$T = T^{**} - b(H - y) + \mu V^2, \quad (12)$$

где μ – погонная масса кабеля.

Описание параметров подводной укладки кабеля

Для определения конкретных численных значений для формы и натяжения провисающей части кабеля необходимо определить исходные параметры укладки кабеля: параметры кабеля (плотность кабеля $\gamma_{каб}$, диаметр кабеля d), гидродинамические параметры воды (плотность $\gamma_{воды} = 1025 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\eta = 0.0013 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$), эксплуатационные параметры укладки (скорость укладки $V = 3$ узла, глубина укладки H , угол схода кабеля $\alpha_{схода}$).

В табл. 1 приведены параметры рассматриваемых силовых подводных кабелей, используемые для энергоснабжения различных морских объектов. Погонные нормальную λ_n и касательную λ_r гидродинамические силы

сопротивления, определим в соответствие с источниками [8, 9] следующим образом (в предположении, что для числа Рейнольдса Re выполняется неравенство $30 < Re < 10^5$):

$$\lambda_n = C_n \gamma_{\text{воды}} \frac{V^2}{2} d, \lambda_\tau = C_\tau V, \quad (13)$$

$$C_n = 1.1 + 4 Re^{-1/2}, C_\tau = \pi \eta Nu,$$

$$Re = \frac{\gamma_{\text{воды}} V d}{\eta},$$

$$Nu = 0.55 Re^{1/2} + 0.084 Re^{2/3},$$

где C_n – коэффициент нормального гидродинамического сопротивления, C_τ – коэффициент касательного гидродинамического сопротивления, Nu – число Нуссельта.

Таблица 1

Параметры кабелей [10]

№	Тип кабеля	Плотность $\gamma_{\text{каб}}$, кг/м ³	Диаметр d , мм
1	2XS2YRAA	2411.1	65
2	ZS-YJQ41	2942.6	114
3	аналог GASLMLTV	3096.8	67

Результаты численного моделирования подводной укладки кабеля

Численная модель реализована с применением программной среды Matlab Math Works [11] и разработанного комплекса программ для инженерной оценки формы и натяжения провисающего участка кабеля [12]. Расчеты проводились на 6-ядерном компьютере с процессором Intel i7 и 16 Гб RAM.

Для подтверждения корректности решения уравнений математической модели необходимо определиться с шагом дискретизации – величиной приращения угла наклона кабеля $d\alpha$. В результате выrolнения анализа сходимости можно сформировать рекомендацию о выборе шага интегрирования, в частности для рассматриваемых параметров подводной укладки кабеля достаточно использовать приращение угла наклона кабеля $d\alpha = 1''$.

На рис. 3-4 представлено влияние угла схода кабеля на форму и натяжение провисающего участка кабеля на примере одножильного кабеля с одиночным бронированием ZS-YJQ41 с учетом действия неоднородной гидростатической силы.

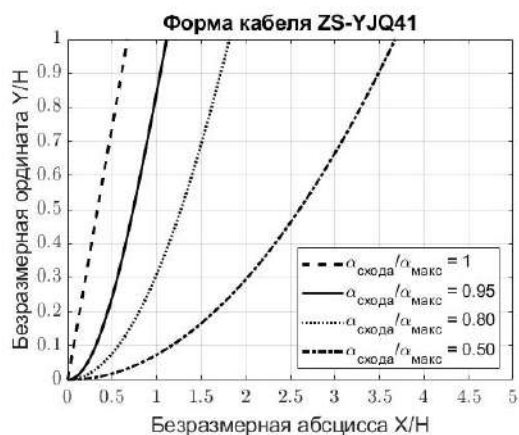


Рис. 3. Влияние величины угла схода кабеля на его форму

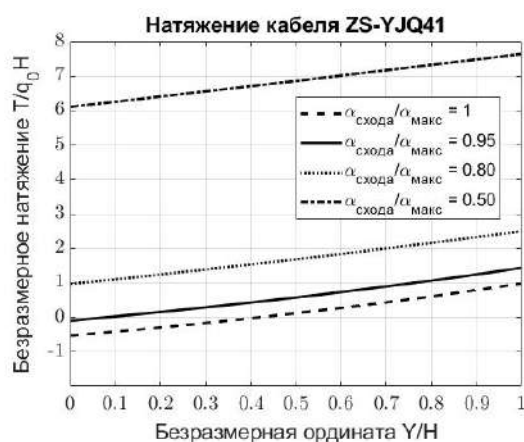


Рис. 4. Влияние угла схода кабеля на его натяжение

Отметим, что при больших значениях угла схода кабеля, натяжение кабеля может приобретать отрицательные значения, т.е. кабель будет претерпевать сжимающие напряжения.

Таким образом, можно определить критическое значение угла схода кабеля, при превышении которого приобретаемая кабелем форма установившегося движения, по всей видимости, будет неустойчивой. Данный эффект согласуется с результатами, полученными Р.Т. Pederson [7].

На рис. 5-6 представлено влияние действия неоднородной гидростатической силы на форму и натяжение провисающего участка кабеля для различных типов кабеля при $\alpha_{\text{схода}} / \alpha_{\text{макс}} = 0.8$. В табл. 2 приведены характеристики подводной укладки кабеля в условиях Арктического бассейна для перспективных месторождений, имеющие практическое значение при проектировании инфраструктуры.

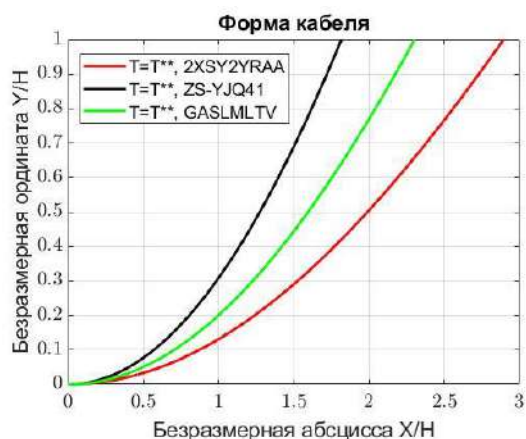


Рис. 5. Влияние неоднородной гидростатической силы на форму кабеля

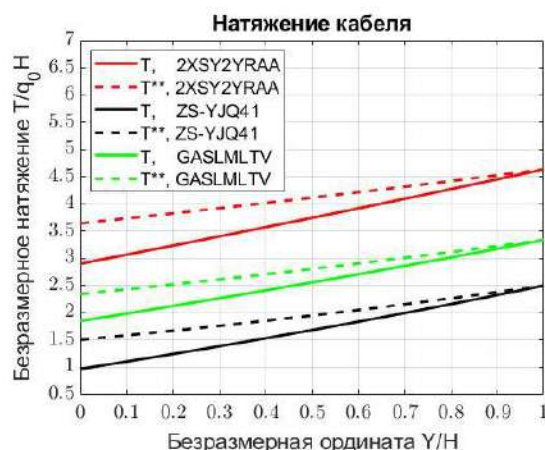


Рис. 6. Влияние неоднородной гидростатической силы на натяжение кабеля

Отметим, что трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XSY2YRAA обладает наиболее полой формой, что объясняется его меньшим диаметром и плотностью. Анализируя результаты натяжения кабеля, представленные на рис. 6, можно заметить, что уточненная модель учета неоднородной гидростатической силы будет иметь меньшее натяжение по сравнению с упрощенной моделью, что согласуется с формулой (12). Также отметим, что различие между моделями увеличивается с увеличением глубины.

Таблица 2

Характеристики укладки кабеля в условиях Арктического бассейна

№	Тип кабеля	Характеристика укладки кабеля	Месторождение		
			Лудловское, 400 м	Ленинградское, 165 м	Медынское-море, 20 м
1	2XS2YRAA	X_{\max} , м	1 160	477	58
		T_{\min} , кН	52.4	21.6	2.6
		T_{\max} , кН	83.6	34.5	4.2
2	ZS-YJQ41	X_{\max} , м	726	300	36
		T_{\min} , кН	74.8	30.9	3.8
		T_{\max} , кН	192.2	79.3	9.7
3	аналог GASLMLTV	X_{\max} , м	921	380	46
		T_{\min} , кН	53.1	21.9	2.7
		T_{\max} , кН	95.7	39.5	4.8

Заключение

В работе рассмотрено влияние угла схода кабеля и действия неоднородной гидростатической силы на форму и натяжение провисающей части кабеля. В качестве объекта исследования выбраны силовые подводные кабели: трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA, одножильный кабель с одиночным бронированием ZS-YJQ41, одножильный кабель с двойным

бронированием – аналог GASLMLTV. В статье представлено дополненное аналитическое решение задачи Рауса-Аппеля и описание параметров подводной укладки в условиях перспективных месторождений, которыми являются: газовое месторождение Лудловское, газоконденсатное месторождение Ленинградское, нефтяное месторождение Медынское-море.

В результате численного моделирования серии задач об определении формы и натяжения

провисающего участка кабеля при его укладке под водой определено рекомендуемое значение приращение угла наклона кабеля, обеспечивающего сходимость. Выявлено, что величина угла схода кабеля оказывает существенное влияние на исследуемые характеристики подводной укладки кабеля. В частности, уменьшение угла схода кабеля приводит к более пологой форме кабеля и как следствие – к увеличению пролета и провисающей части кабеля, что в свою очередь приводит к увеличению натяжения кабеля. Представленная в настоящей статье аналитическая модель подводной укладки кабеля с учетом неоднородной гидростатической силы объединяет работы Р.Т. Pederson и Д.Р. Меркина. Действие неоднородной гидростатической силы оказывает влияние только на натяжение кабеля. Интересной особенностью результатов моделирования является наличие

области сжатия кабеля вблизи поверхности дна при определенных условиях подводной укладки кабеля. Наиболее вероятно, что образующаяся форма динамического равновесия кабеля является неустойчивой и не реализуется. При укладке кабеля в таких условиях может наблюдаться динамика и выход кабеля из плоского движения.

Представленные в статье зависимости для формы и натяжения провисающего участка кабеля при его укладке под водой представлены в безразмерном виде для удобства использования результатов моделирования. Практическая ценность работы состоит в определении характеристик укладки кабелей различных типов в условиях Арктического бассейна, что способствует проектированию инфраструктуры перспективных месторождений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Центра Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, идентификатор субсидии 0000000007518P240002.

Литература

- Новиков Ю.Н., Ганжула С.В. Особенности оценки месторождений углеводородного сырья арктического шельфа России и их переоценки в соответствии с новой классификацией запасов. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008 (3). № 1. 19 с.
- Ковалев И.В. Современное гидрохимическое состояние акватории Печорского моря в районе проведения разведочного бурения на углеводороды. Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 5. С. 839-842.
- Маммадов С.М., Ампилов Ю.П., Холодильников В.А., Хоштария В.Н. Сколько стоят месторождения арктического шельфа в условиях кризиса. Газовая промышленность. 2017. №6. С. 16-24.
- Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
- Керестень И.А., Михайлов А.А., Войнов И.Б., Боровков А.И. Численное моделирование укладки растяжимого кабеля на дно моря с движущегося судна с учетом гидродинамических сил сопротивления воды. Подводные исследования и робототехника. 2019 №1 (27). С. 12-20.
- Зиновьева Т.В. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке на морское дно. Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 220-238.
- Pederson P.T. Equilibrium of offshore cables and pipelines during laying. Int. Shipbuilding Progress. 1975. V. 22. P. 399-408.
- Park J., Kim N. Dynamics of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a tow fish towed by a cable. Int. Journ. of Naval Archit. and Ocean Eng. 2015. Vol. 7, No. 2. P. 409-425.
- Choc Y.I., Casarella M.J. Hydrodynamic resistance of towed cables. Journ. of Hydronautics. 1971. Vol. 5, No. 4. P. 126-131.
- Керестень И.А., Корнилова Е.В., Михайлов А.А. Конечно-элементное определение эффективных коэффициентов жесткости для силовых подводных кабелей с гетерогенной структурой. Морские интеллектуальные технологии. 2019 № 3 (45) том 3. С. 208-215.
- Потемкин В.Г. Введение в MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2000.
- Керестень И.А., Войнов И.Б. Конечно-разностная программа укладки кабеля под водой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019613644, Роспатент, М., 20.03.19.

References

- Novikov Yu.N., Ganzhula S.V. Osobennosti otsenki mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya arkticheskogo shel'fa Rossii i ikh pereotsenki v sootvetstvii s novoy klassifikatsiey zapasov [Features of the assessment of hydrocarbon deposits of the Arctic shelf of Russia and their revaluation in accordance with the new classification of reserves]. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Oil and gas geology. Theory and practice]. 2008 (3). № 1. 19 p.
- Kovalev I.V. Sovremennoe gidrokhimicheskoe sostoyanie akvatorii Pechorskogo morya v rayone provedeniya razvedochnogo bureniya na uglevodorody [The current hydrochemical state of the Pechora Sea water area in the area of exploration drilling for hydrocarbons]. Vestnik MGTU [Bulletin of the Moscow State Technical University]. 2006. Vol. 9, № 5. P. 839-842.
- Mammadov S.M., Ampilov Yu.P., Kholodilov V.A., Khoshtariya V.N. Skol'ko stoyat mestorozhdeniya arkticheskogo shel'fa v usloviyakh krizisa [What is the cost of the Arctic shelf field in the conditions of the crisis]. Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]. 2017. №6. P. 16-24.
- Merkin D.R. Vvedenie v mekhaniku gibkoy niti [Introduction to the mechanics of flexible thread]. M.: Nauka, 1980. 240 p.

5. Keresten' I.A., Mikhaylov A.A., Voynov I.B., Borovkov A.I. Chislennoe modelirovanie ukladki rastyazhimogo kabelya na dno morya s dvizhushchegosya sudna s uchetom gidrodinamicheskikh sil soprotivleniya vody [Numerical simulation of tensile cable laying onto seabed from moving vessel with account of hydrodynamic water resistance forces]. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater research and robotics]. 2019 № 1 (27). P. 12-20.
6. Zinov'eva T.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda pri ukladke na morskoe dno [Analysis of the stress-strain state of the pipeline during laying on the seabed]. Neftegazovoe delo [Oil and gas business]. 2011. № 1. P. 220-238.
7. Pederson P.T. Equilibrium of offshore cables and pipelines during laying. Int. Shipbuilding Progress. 1975. V. 22. P. 399-408.
8. Park J., Kim N. Dynamics of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a tow fish towed by a cable. Int. Journ. of Naval Archit. and Ocean Eng. 2015. Vol. 7, No. 2. P. 409-425.
9. Choc Y.I., Casarella M.J. Hydrodynamic resistance of towed cables. Journ. of Hydronautics. 1971. Vol. 5, No. 4. P. 126-131.
10. Keresten' I.A., Kornilova E.V., Mikhaylov A.A. Konechno-elementnoe opredelenie effektivnykh koeffitsientov zhestkosti dlya silovykh podvodnykh kabeley s geterogennoy strukturoy [Finite element definition of effective stiffness coefficients for power submarine cable with heterogeneous structure]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2019 № 3 (45) Vol 3. P. 208-215.
11. Potemkin V.G. Vvedenie v MATLAB [Introduction to MATLAB]. M.: Dialog-MIFI, 2000.
12. Keresten' I.A., Voynov I.B. Konechno-raznostnaya programma ukladki kabelya pod vodoy. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM № 2019613644 [A finite-difference program of underwater cable laying. Certificate of registration of a computer program № 2019613644], Rospatent, M., 20.03.19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Алексеевич Керестень, кандидат технических наук, инженер-исследователь учебной научно-исследовательской лаборатории "Вычислительная механика", Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: keresten@compmechlab.com

Иван Алексеевич Попов, ассистент высшей школы механики и процессов управления, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: popov_ia@spbstu.ru

Михаил Викторович Ховайко, ведущий инженер учебной научно-исследовательской лаборатории "Вычислительная механика", Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

Ilya A. Keresten, Ph.D. (Eng), research engineer of educational scientific-research laboratory "Computational Mechanics", Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: keresten@compmechlab.com

Ivan A. Popov, assistant of higher school of mechanics and control processes, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: popov_ia@spbstu.ru

Mikhail V. Khovaiiko, lead engineer of educational scientific-research laboratory "Computational Mechanics", Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

Поступила в редакцию: 24.06.2021

Принята к публикации: 12.08.2021



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**